
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

**Piezoelektrické transformátory ve tvaru
disku s radiálně dělenou elektrodou**

**Piezoelectric transformers in the form of disc
with radially divided electrode**

Bakalářská práce

Autor:	Ondřej Štípek
Vedoucí práce:	Doc. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Petr Půlpán

V Liberci 19. 5. 2006

Originál zadání bakalářské práce

(viz. dokument: zadani_BP.doc)

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

19.5.2006

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, Doc. Mgr. Jiřímu Erhartovi, Ph.D., za cenné rady, připomínky a výklad potřebné teorie, Ing. Petru Půlpánovi za rady při měření a vysvětlení problémů při vypracování bakalářské práce a firmě APC International, Ltd. (Piezokeramika, s. r. o., Libřice) za poskytnutí vzorků pro měření. V neposlední řadě bych rád poděkoval rodičům za vytvoření skvělých studijních podmínek.

Ondřej Štípek

Piezoelektrické transformátory ve tvaru disku s radiálně dělenou elektrodou

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je měření frekvenčních charakteristik transformačního poměru a zkoumání závislosti transformačního poměru na poměru ploch elektrod kruhových piezoelektrických transformátorů s radiálně dělenou elektrodou. Transformátory pracují v módu radiálních kmitů. Práce je zprvu zaměřena na základní poznatky o feroelektrických (piezoelektrických) keramikách, především o PZT keramice. Dále se zaměřuje na piezoelektrické transformátory, jejich výhody, aplikace a modifikace. V práci je popsán proces přípravy vzorků a vlastního měření charakteristik transformátorů. Sleduje se velikost transformačního poměru a posun rezonanční frekvence v závislosti na zatížení. Naměřený transformační poměr nezatíženého transformátoru při rezonančním kmitočtu dosahuje téměř 20. Zjištěné poznatky naleznou své uplatnění v dalším výzkumu piezoelektrických transformátorů.

Piezoelectric transformers in the form of disc with radially divided electrode

Abstract

This bachelor thesis deals with the measurement of transformation ratio of a piezoelectric disc shaped transformers with radially divided electrode. The transformers are operated in radial vibration mode. The first part is focused on the basic knowledge about ferroelectric (piezoelectric) ceramics, mainly about PZT ceramics. Afterwards, the advantages, applications and types of piezoelectric transformers (PT) are summarized (described). The sample preparation and the actual measurement process are described. The frequency dependence of voltage gain as well as the shift of a resonant frequency on electrodes' shape and on PT's load are presented. Maximum transformation ratio 20 is achieved at no-load condition. Obtained information could be used in further research of PTs.

Obsah:

1. Úvod	8
1.1 Piezoelektrický jev	8
1.2 PZT keramika	11
1.3 Polarizace PZT keramiky	14
1.4 Vlastnosti PZT keramiky	18
1.5 Výroba PZT keramiky	19
1.6 Aplikace PZT keramiky	20
2. Transformátory	21
2.1 Elektromagnetický transformátor	21
2.2 Piezoelektrický transformátor	23
2.2.1 Rosenův typ piezoelektrického transformátoru	25
2.2.2 Další typy piezoelektrických transformátorů	27
2.3 Náhradní obvod piezoelektrického transformátoru se zátěží	29
3. Design a příprava vzorků piezoelektrických transformátorů	30
3.1 Design piezoelektrických transformátorů	30
3.2 Postup přípravy vzorků piezoelektrických transformátorů	32
4. Vlastní měření	34
4.1 Měření frekvenčních charakteristik piezoelektrických transformátorů	34
4.2 Výsledky měření	36
5. Diskuze	39
5.1 Hodnocení výsledků	39
6. Závěr	44
Použitá literatura:	45
Příloha A – Transformátor s poměrem ploch elektrod 1,37	46
Příloha B – Transformátor s poměrem ploch elektrod 3,69	49

Seznam použitých zkratk a symbolů:

APC	American Piezo Ceramics Inc.
EPC	European Piezo Ceramics Ltd.
MPB	Morphotropic Phase Boundary - morfolotropní fázová hranice
PT	Titaničitan olova - PbTiO_3
PZ	Zirkoničitan olova - PbZrO_3
PZT	Piezoelektrická keramika ve složení $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$
GPB	Měřicí systém podle standartu IEEE 488

T_C	Curieova teplota
E_C	Koercitivní elektrické pole
P_R	Remanentní polarizace
P_s	Spontánní polarizace
T_λ	Tenzor mechanického napětí
E_i	Vektor elektrického pole
S_λ	Tenzor mechanické deformace
D_i	Vektor indukce elektrického pole
A_u	Napěťové zesílení
η	Účinnost
Z	Impedanční zátěž transformátoru
p	Transformační poměr
$\Delta f_r/f_r$	Relativní posun rezonanční frekvence
ϵ_{33}	Permitivita PZT keramiky
ϵ_0	Permitivita vakua

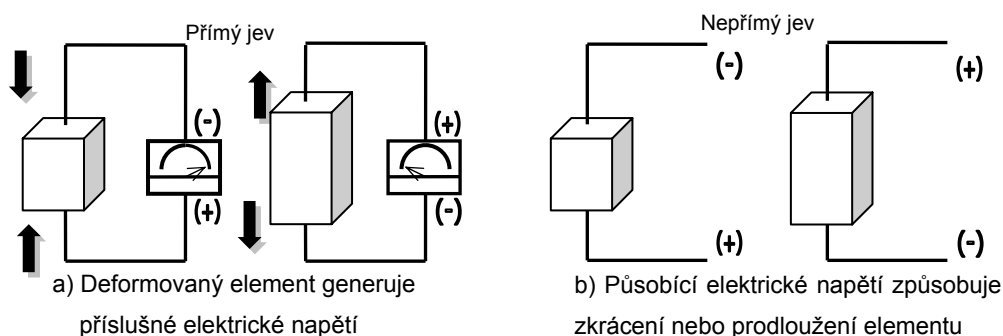
1. Úvod

1.1 Piezoelektrický jev

Již v roce 1880 objevili bratři Jacques a Pierre Curieové piezoelektrický jev na vzorku krystalů turmalínu a křemene [5]. Přišli na to, že když krystaly vystavili deformaci, tak se na jejich povrchu objevují elektrické náboje. Později (1881) nazval Hankel tento jev přímým piezoelektrickým jevem (slovo piezo pochází z řeckého slova *piezō* = tlak nebo stisknutí). Nepřímý piezoelektrický jev matematicky odvodil ze základních termodynamických principů Lippmann v roce 1881. Bratři Curieové tento předpoklad následně experimentálně potvrdili. Aplikací elektrického pole na krystal došlo k prodloužení nebo zkrácení krystalů dle polarity intenzity pole.

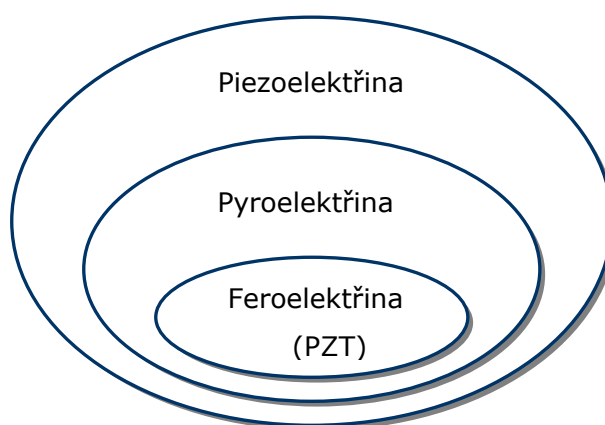
Přímý piezoelektrický jev popisuje Obr. 1.1(a), kde deformace kvádrů z piezoelektrického materiálu způsobuje vznik elektrického napětí. Nepřímý piezoelektrický jev popisuje Obr. 1.1(b), zde přiložené elektrické napětí deformuje kvádr z piezoelektrického materiálu.

Obr. 1.1 Přímý a nepřímý piezoelektrický jev [6]



Existuje ještě jev pyroelektrický, přídavná elektrická polarizace pyroelektrika (tj. natáčení elementárních elektrických dipólů) při změně teploty ve směru polární osy, čímž se dočasně poruší vzájemná kompenzace nosičů vázaného a volného náboje na povrchu pyroelektrického tělesa (např. při zahřátí krystalu turmalínu se objeví elektrické náboje na protilehlých koncích krystalu). Jde o tepelný zdroj stejnosměrného proudu a jeho velikost je úměrná velikosti krystalu a rozdílu teplot.

Krystalické materiály se obecně dělí podle symetrie na třicet dva krystalových tříd, které můžeme podle společné hlavní osy nebo společných osových kombinací rozdělit do sedmi krystalových soustav. Látka vykazující piezoelektrický jev nesmí mít střed symetrie, což odpovídá jednadvaceti krystalovým třídám (v těchto třídách ještě existuje jedna třída 432, která má symetrické rozložení prvků a nevykazuje piezoelektrický jev). Z těchto dvaceti tříd je zde deset, které mají pouze jednu polární osu otáčení, a vykazují tak pyroelektrický jev. Některé z těchto tříd ještě vykazují feroelektrický jev, tím rozumíme možnost existence spontánní elektrické polarizace jejíž směr lze měnit působením vnějšího elektrického pole. Hierarchii výše uvedených jevů ukazuje Obr. 1.2.



Obr. 1.2 Hierarchie elektromechanických jevů

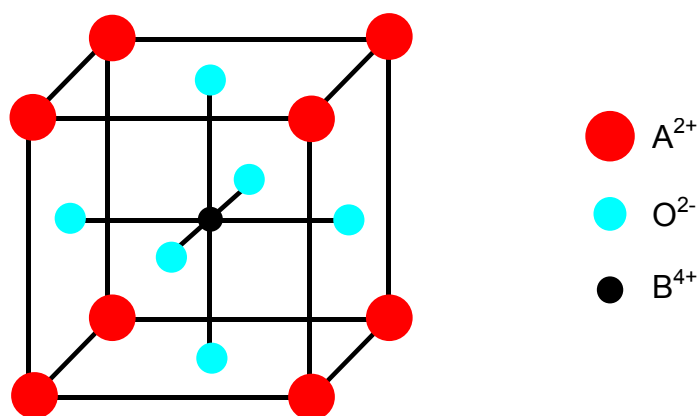
Ve 20. století piezoelektrická keramika, založená na oxidech kovů a jiných umělých materiálech, umožnila použít piezoelektrický a inverzní piezoelektrický jev v mnoha nových aplikacích. Tyto materiály jsou obvykle fyzikálně odolné a chemicky stálé a jsou relativně málo nákladné pro výrobu. Složení, tvar a rozměry piezoelektrického keramického prvku mohou být uzpůsobeny ke splnění požadavků specifického účelu. Keramiky vyráběné ze sloučenin zirkoničitanu olova/titaničitanu olova se projevují větší citlivostí a vyšší provozní teplotou než u keramik jiných složení. Keramiky PZT (tuhý roztok zirkoničitanu titaničitanu olovnatého $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$) jsou v současné době

nejvíce používané piezoelektrické keramiky. Tyto keramiky jsou také levnější a méně náročné na výrobu než výroba velkých piezoelektrických monokrystalů.

Piezoelektrické materiály našly své uplatnění v mnoha oblastech. Přímý piezoelektrický efekt se používá jako zdroj náboje (zapalovače), senzory tlaku, deformací, vibrací (mikrofony) a podobně. Nepřímý piezoelektrický jev se používá při generování zvukových (reproduktory) a ultrazvukových signálů v pevných látkách, kapalinách (sonar) a podobně. Své uplatnění mají také mají v optice (fotoaparáty, mikroskopy), kde zajišťují piezoelektrické motory velice přesný a jemný posun. Dále se používají pro tvorbu filtrů a piezoelektrický rezonátorů určených zejména pro stabilizaci kmitočtů přesných zdrojů kmitočtu a času.

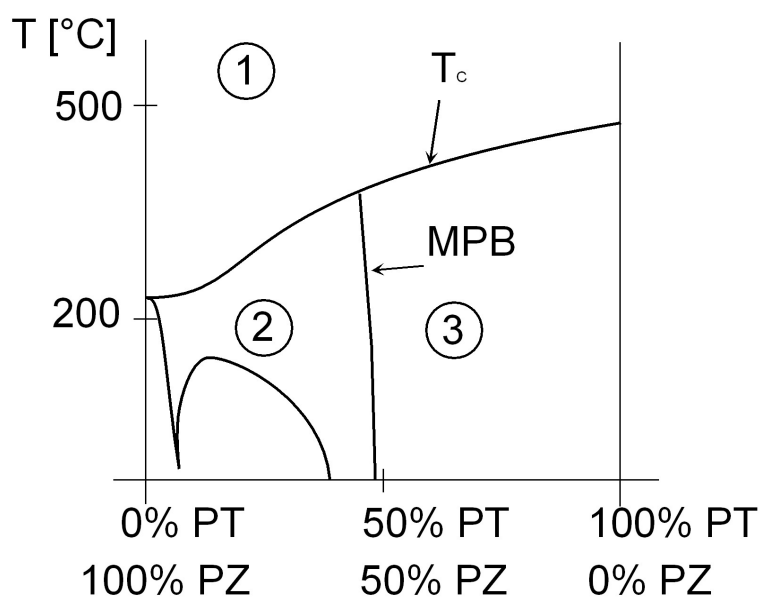
1.2 PZT keramika

Piezokeramika se skládá z tuhých roztoků oxidů Pb, Zr, Ti, tj. PbZrO_3 (PZ) a PbTiO_3 (PT). Materiály na bázi těchto tuhých roztoků jsou označovány jako PZT keramika – $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$. Patří mezi nejvíce vyráběnou feroelektrickou keramiku. Díky tomu, že feroelektrické vlastnosti keramiky zaručují také její piezoelektrické vlastnosti, může PZT keramika sloužit k přímému převodu elektrického pole na mechanickou deformaci a naopak. Čistý PT je feroelektrický s tetragonální symetrií (4mm), čistý PZ je také feroelektrický ovšem s trigonální symetrií (3m), popřípadě antiferoelektrický s ortorombickou symetrií. Obě látky procházejí fázovým přechodem z paraelektrické kubické fáze ($m\bar{3}m$) a mají perovskitovou strukturu (Obr. 1.3.).



Obr. 1.3 Základní buňka perovskitové struktury ABO_3 : $\text{A}^{2+} = \text{Pb}$; $\text{B}^{4+} = \text{Zr, Ti}$ [6]

Složení oxidů PZ a PT se nejčastěji používá v poměru 48% PZ a 52% PT. V této oblasti na stavovém diagramu (Obr 1.4.) se nachází morfotropní fázová hranice (MPB), kde v důsledku existence stejné fáze materiálu pro široký teplotní rozsah dochází velkému nárůstu materiálových vlastností. Existuje tzv. Curieho teplota (T_C), při které PZT keramiky přechází z feroelektrické do paraelektrické fáze, která je nepiezoelektrická. Teplota přechodu je důležitým parametrem pro použití PZT keramiky v aplikacích. U PZT keramiky je Curieova teplota T_C v rozmezí 150 až 360°C v závislosti na jejím složení.

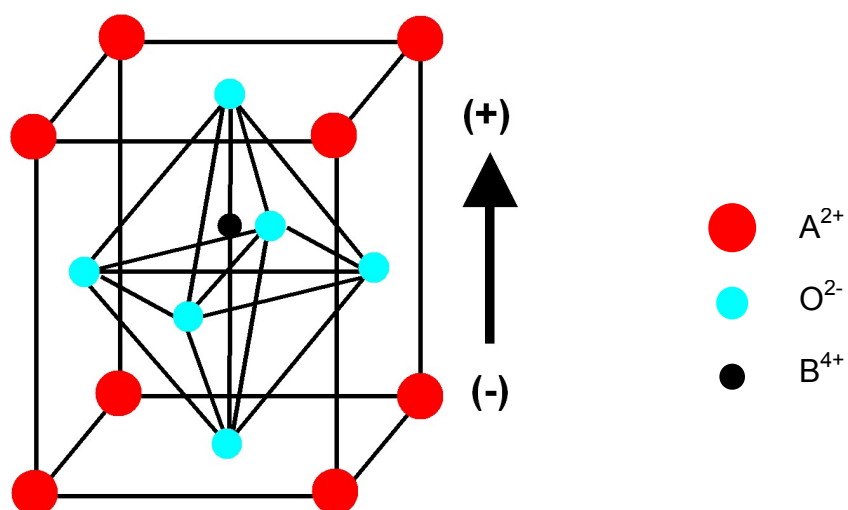


- 1 - Paraelektrická kubická oblast (m 3 m)
- 2 - Feroelektrická trigonální oblast (3m), 8 doménových stavů
- 3 - Feroelektrická tetragonální oblast (4mm), 6 doménových stavů

Obr. 1.4 Stavový diagram systému PZT [1]

Při poklesu teploty pod Curieho teplotu nestačí tepelná energie udržet původní stav, iont Ti^{4+} se vysune ze své centrální polohy a svoji polohu ztratí i ionty Pb^{2+} . Ionty O^{2-} svoji polohu nezmění. Základní buňka mění symetrii na tetragonální. Vzniká tak elementární dipól. (Obr. 1.5). Všechny základní buňky, u kterých se ionty vychýlí přibližně jednotným směrem, vytvoří doménu. Doména je prostorově souvislá oblast se stejným dipólovým momentem v elementárních buňkách.

Domény vlastně tvoří makroskopické elektrické dipóly. V tělese jsou však jejich momenty rozloženy nepravidelně, a proto je také výsledný dipólový moment nulový. Feroelektrické fáze materiálu umožňují existenci několika tzv. doménových stavů lišících se orientací polární osy vzhledem k původnímu kubickému souřadnému systému.

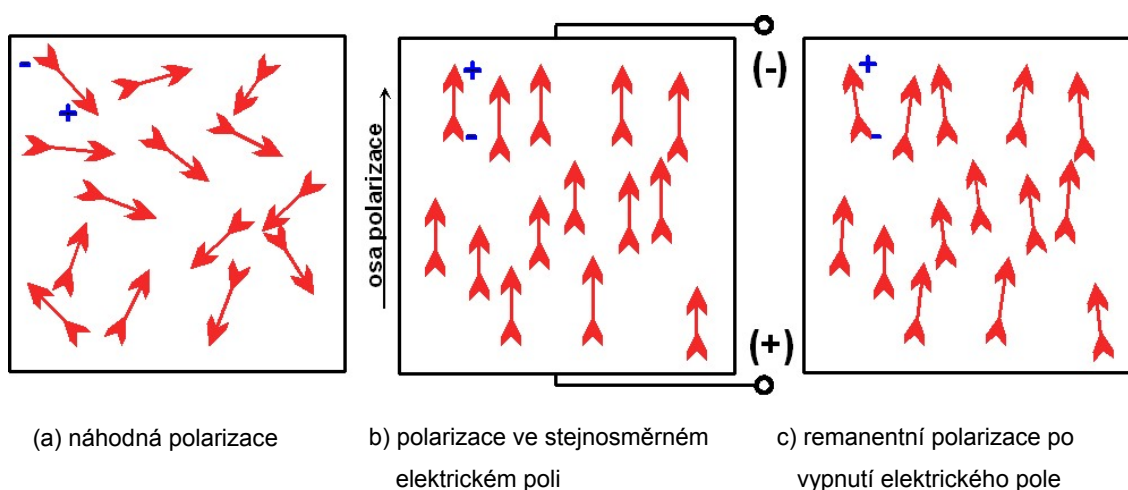


Obr. 1.5 Základní buňka perovskitové struktury pod Curieho teplotou [6]

Materiálové vlastnosti PZT keramiky můžeme ovlivnit úpravou chemického složení. Přidáním malým množstvím doplňujících příměsí můžeme docílit příznivých elektrických vlastností, které mohou být ale konkurenční a negativně ovlivňovat jiné vlastnosti (např. většímu piezoelektrickému koeficientu d_{33} zpravidla odpovídá větší permitivita ϵ_{33}). Příměsemi mohou být např. atomy La, Nb, Sr, Fe, Mn, Cr a dalších prvků.

1.3 Polarizace PZT keramiky

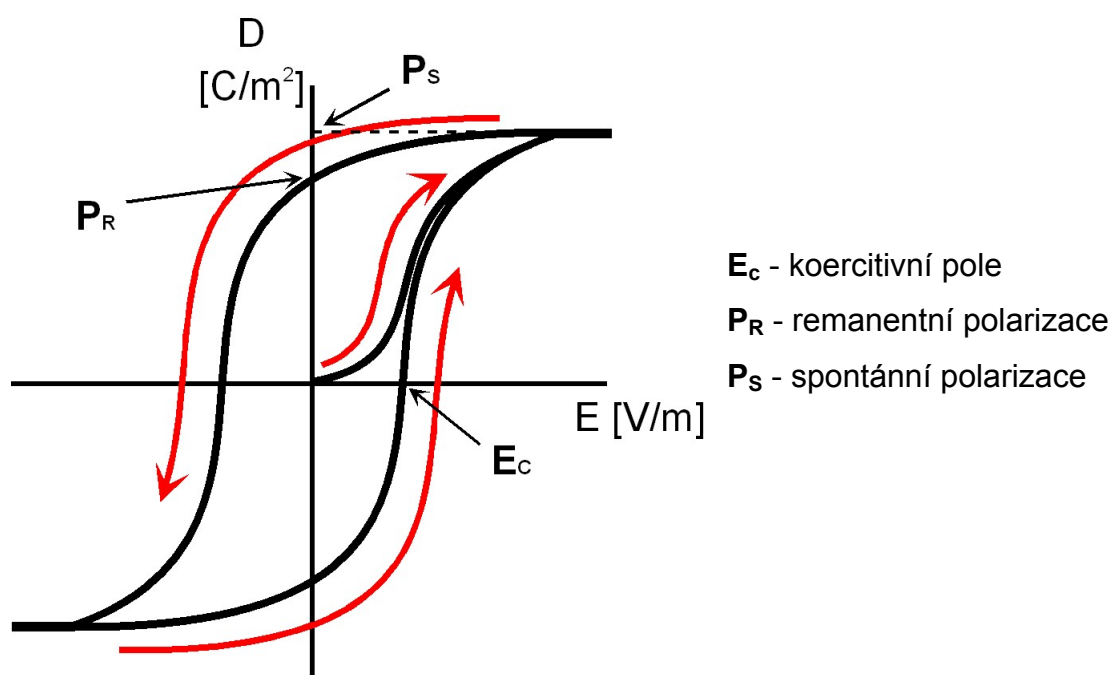
PZT keramika je polykrystalický materiál se zrna, ve kterých jsou domény, o typické velikosti několika μm . Doménovou strukturu lze měnit pomocí mechanického působení (piezoelektrickým jevem), změnou teploty (pyroelektrickým jevem) a elektrickým polem. Ačkoliv jednotlivá zrna PZT keramiky piezoelektrická jsou, PZT keramika před polarizací piezoelektrická není díky nahodilému uspořádání zrn vůči sobě. V polykrystalickém materiálu tak je třeba „srovnat“ směry spontánních polarizací v zrnech co nejvíce do jednoho směru.



Obr. 1.6 Polarizace piezoelektrické keramiky [6]

Vložíme-li PZT keramiku do dostatečně intenzivního elektrického pole, vyberou se směry spontánních polarizací v zrnech tak, aby svíraly co nejmenší úhel se směrem polarizačního pole. Dochází k polarizaci (Obr. 1.6) Polarizace se v praxi provádí výhradně působením elektrického pole, které lze dobře kontrolovat. Při polarizaci dochází také k mechanickému působení mezi zrna, které může způsobit prasknutí keramiky. Elektrické pole užívané k polarizaci PZT keramiky je samozřejmě závislé na typu keramiky. Obvykle se pohybuje od 2 do 4 kV/mm. Pro polarizaci některých typů PZT keramiky se užívá zvýšená teplota (pod Curieovou teplotou), která pozitivně ovlivňuje mobilitu doménových stěn (DS) a polarizaci usnadňuje. V principu je možné polarizovat PZT keramiku

také zahřátím nad Curieovu teplotu, následným přiložením elektrického pole a snížením teploty. PZT keramika s chemickým složením v okolí MPB vyniká dobrou polarizovatelností. Koexistence fází v blízkosti MPB totiž dává k dispozici čtrnáct možných orientací spontánní polarizace, oproti osmi (resp. šesti) v trigonální (resp. tetragonální) fázi. MPB se projevuje také extrémními materiálovými vlastnostmi pro chemická složení PZT v její blízkosti.



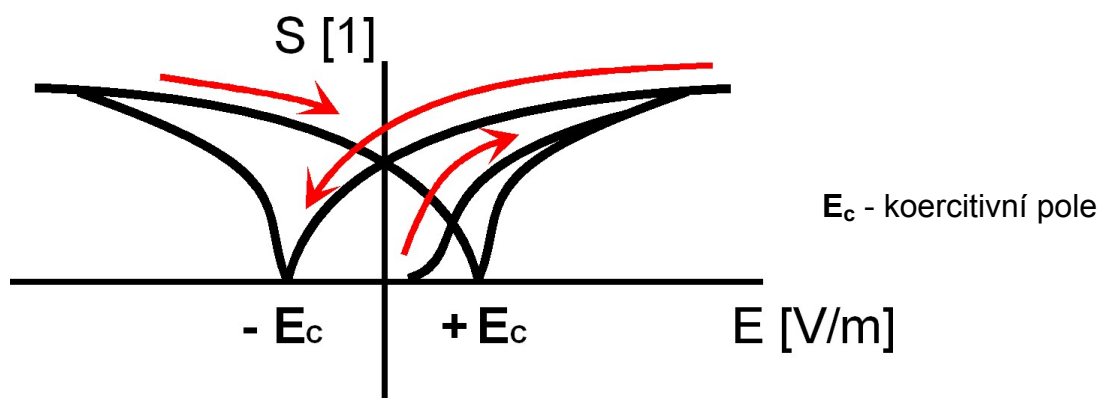
Obr. 1.7 Diagram hysterézní smyčky D-E [1], [6]

Analogicky jako u feromagnetických materiálů (permanentních magnetů) i u feroelektrických materiálů existuje hystereze, která je projevem doménové struktury, popřípadě projevem přepolarizovatelnosti domén. Na obrázku 1.7 je vidět typický diagram hysterézní smyčky D-E pro prvek z piezoelektrické keramiky. Spontánní polarizace P_s každé domény přispívá k celkové polarizaci P a posuvy doménových stěn tak ovlivňují její hodnotu, což se projevuje na tvaru hysterézní smyčky. Průsečík s osou D [C/m^2] udává hodnotu remanentní polarizace P_R , což je hodnota polarizace po odpojení elektrického pole.

Na obrázku 1.8 je také zobrazeno, že polarizace je vždy spojena s deformací tělesa. Jde o vzájemnou závislost mezi deformací S a intenzitou elektrického pole E . Hystereze v mechanické deformaci komplikuje použití PZT keramiky v aktuátorech.

Nasycená polarizace vzorku se projevuje při vysokých hodnotách elektrického pole; naopak posuvy doménových stěn probíhají při nižších elektrických polích mezi dvěma nasycenými polarizačními stavy. Remanentní polarizace P_R pro PZT keramiku pro složení v blízkosti MPB jsou typicky 20 až 30 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Plocha hysterezní smyčky reprezentuje množství tepla uvolněného ve vzorku při jednom průchodu hysterezní smyčkou.

Piezoelektrické keramiky lze tak rozlišit na keramiky s „úzkou“ smyčkou označujeme jako tvrdou (hard) PZT a PZT s „širokou“ smyčkou jako měkkou (soft) PZT. Tvrdé PZT mají menší dielektrické ztráty ($\tan \delta$) („hůře“ se hýbe s jejími doménami) a používají se v aplikacích využívající vyšší přenos energie (ultrazvukové čištění a svařování), jsou tedy vhodné pro piezoelektrické transformátory. Kdežto měkké PZT mají větší dielektrické ztráty („snadněji“ se pohybuje s jejími doménami) a jsou vhodné spíše pro senzory a aktuátory.



Obr. 1.8 Diagram závislosti deformace a elektrického pole S - E [6]

Typické hodnoty koercitivního pole E_c pro PZT keramiku jsou kolem 0,5 až 1 kV/mm. Polarizování keramiky musí probíhat při elektrických polích větších než E_c , aby bylo dosaženo stabilního stavu. Typické hodnoty dielektrických ztrát ($\tan \delta$) jsou 0,5-2,5 % podle typu PZT keramiky.

Pro výrobu piezoelektrických transformátorů jsem použil keramiku typu APC 841, která patří mezi tvrdé keramiky. Materiálové vlastnosti PZT keramiky vyráběné v ČR (EPC International, Ltd., Piezokeramika, s. r. o., Libřice) jsou uvedeny v Tab. 1 [1].

Vlastnost	Jednotka	APC840	APC841	APC850	APC855	APC856	APC880
typ	-	tvrdá	tvrdá	měkká	měkká	měkká	tvrdá
ϵ_{33}/ϵ_0	1	1250	1350	1750	3250	4100	1000
$\tan\delta$	%	0,40	0,35	1,40	2,00	2,70	0,35
T_c	°C	325	320	360	195	150	310
k_p	1	0,59	0,60	0,63	0,65	0,65	0,50
k_{33}		0,72	0,68	0,72	0,74	0,73	0,62
k_{31}		0,35	0,33	0,36	0,38	0,36	0,30
k_{15}		0,70	0,67	0,68	0,66	0,65	0,55
d_{33}	10^{-12}C/N	290	275	400	580	620	215
$-d_{31}$	nebo	125	109	175	270	260	95
d_{15}	10^{-12}m/V	480	450	590	720	710	330
g_{33}	10^{-3}Vm/N	26,5	25,5	26	19,5	18,5	25
$-g_{31}$	nebo	11	10,5	12,4	8,8	8,1	10
g_{15}	$10^{-3}\text{m}^2/\text{C}$	38	35	36	27	25	28
s_{11}^E	$10^{-12}\text{m}^2/\text{N}$	11,8	11,7	15,3	14,8	15,0	10,8
s_{33}^E		17,4	17,3	17,3	16,7	17,0	15,0
ρ	g/cm^3	7,6	7,6	7,7	7,5	7,5	7,6
Q_m	1	500	1400	80	75	72	1000

Tab. 1 Materiálové vlastnosti některých typů PZT keramiky (EPC International, Ltd., Piezokeramika, s. r. o., Libřice) [1]

1.4 Vlastnosti PZT keramiky

Libovolnou piezokeramiku lze před polarizací považovat za izotropní materiál, po polarizaci má polární symetrii ∞mm . Materiálové koeficienty elektromechanických vlastností (elastické s , piezoelektrické d a dielektrické ϵ) jsou anizotropní, tj. mají různé hodnoty v různých směrech vzhledem ke směru polarizace.

Vztahy mezi mechanickým napětím T_λ , elektrickým polem E_i , mechanickou deformací S_λ a indukcí elektrického pole D_i dávají stavové rovnice (1.4.1 a 1.4.2) [1].

$$S_\lambda = s_{\lambda\mu}^E T_\mu + d_{i\lambda} E_i \quad (1.4.1)$$

$$D_i = d_{i\mu} T_\mu + \epsilon_{ij}^T E_j \quad (1.4.2)$$

Koeficienty materiálových vlastností stavové rovnice závisejí díky piezoelektrickému jevu současně na mechanických i elektrických okrajových podmínkách. Ty se nejčastěji označují indexy E, D, popř. T, S, dle okrajových podmínek.

Jejich obecně tenzorové složky lze s využitím symetrie zjednodušeně zapsat v maticovém tvaru (1.4.3) [1].

$$\begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (1.4.3)$$

1.5 Výroba PZT keramiky

PZT keramika se vyrábí metodami práškové metalurgie. Výrobní proces se dá rozdělit do následujících bodů:

- Mletí surovin (oxidů PbO , ZrO_2 , TiO_2 ve stechiometrickém poměru podle požadovaného chemického složení) v kulových mlýnech
- Míchání surovin na úrovni jednotlivých zrn materiálu a velikost zrn se změní
- Kalcinace (za zvýšené teploty), při které se uvolní krystalová voda ze surovin a proběhne příslušná chemická reakce na tuhý roztok
- Mletí na velikost zrn asi 1 až 10 μm
- Přidání organického pojiva
- Vytváření tvarů keramických dílů (lisování do forem, atd.)
- Vypálení pojiva při vysoké teplotě (1200°C až 1300°C), čímž získáme zvětšení hustoty a zmenšení velikosti pórů
- Opracování (broušením, řezáním, vrtáním, atd.)
- Nanášení elektrod (napařování Au, Pt nebo metodou zvanou screen-plating, spojenou s vypálením pro Ag pastu
- Polarizace v oleji, který má větší elektrickou pevnost než vzduch
- Čištění od oleje organickými rozpouštědly v ultrazvukových myčkách
- Testování materiálových vlastností prvků podle požadavků zákazníka (mechanická kontrola)
- Balení a expedice

Konečné výrobky z PZT keramiky se připravují podle požadavků zákazníka ze standardní nabídky PZT prášků. Obvyklé tvary PZT elementů jsou disky, desky, tyčinky, válečky, trubičky, speciální tvary, také polokoule a fokusované čočky.

1.6 Aplikace PZT keramiky

Použitelnost PZT keramiky závisí na teplotě, elektrickém poli a mechanickém zatížení. Tyto všechny vlivy mohou mít vliv na doménovou strukturu materiálu a výrobci doporučují meze těchto vlivů, kdy lze ještě zaručit stabilní materiálové vlastnosti a chování keramiky. V blízkosti Curieovy teploty se vlastnosti materiálu výrazně mění. Může to mít vliv například na teplotní závislost rezonančního kmitočtu piezoelektrického rezonátoru. Dalším faktorem je mechanické napětí, kdy musíme dbát na to, aby pracovní oblast byla posunuta do oblasti tlaků a ne do oblasti tahů, ty keramika méně snáší.

Vlastnosti PZT keramiky se také vyvíjejí v čase, dochází k tzv. „stárnutí“ keramiky. Krátce po polarizaci dosahují hodnoty např. piezoelektrického koeficientu d_{33} maximálních hodnot, potom se zmenšují. Proto výrobci často uvádí čas od polarizace, kdy byl materiálový koeficient měřen.

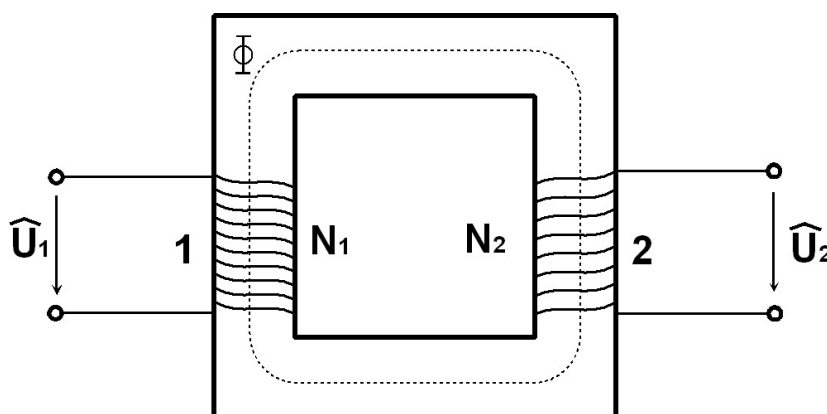
Příklady aplikací PZT keramiky:

- Zapalovače, palivové systémy, piezoelektrické transformátory
- Rezonátory (ultrazvukové čištění a svařování, lékařské diagnostické nástroje, rozprašování kapalin, atd.)
- Převodníky (měření neelektrických veličin jako síla, zrychlení, tlak)
- Aktuátory (piezoelektrické motorky, bimorfy, unimorfy)
- Aplikace pro tlumení chvění a hluku
- Senzory (nárazu, parkovací senzory u automobilu, sonary)
- Paměti FRAM (podobné EEPROM, ale založeny na orientaci elektrického pole)
- Frekvenční keramické filtry a mnoho dalších [7]

2. Transformátory

2.1 Elektromagnetický transformátor

Elektromagnetický transformátor je netočivý elektrický stroj pracující na principu elektromagnetické indukce. Používá se ke změně parametrů střídavého proudu při stálém kmitočtu.



Obr. 2.1 Základní části transformátoru [7]

Transformátor se skládá ze tří základních částí, znázorněných na Obr. 2.1:

- Primární elektrický obvod je tvořen cívkou 1 o N_1 závitů
- Sekundární elektrický obvod je tvořen cívkou 2 o N_2 závitů
- Magnetický obvod (uzavřené jádro feromagnetického materiálu), zprostředkovávající přenos energie mezi primárním a sekundárním vinutím

Když je na primární stranu s N_1 závitů připojené harmonické, časově proměnné napětí u_1 , vznikne ve vinutí časově proměnný proud i_1 , který vytvoří v magnetickém obvodu časově proměnný magnetický tok Φ_1 . Indukční čáry magnetického toku jsou spřažené se závitů obou cívek, tedy i s cívkou s N_2 závitů, ve které se indukuje harmonické napětí u_2 . Pokud není na sekundár připojena zátěž, je na výstupních svorkách napětí naprázdno u_2 . Po připojení zátěže poteče sekundárním obvodem proud i_2 , vytvářející magnetický tok Φ_2 . Oba toky se sčítají jako fázory a vytváří společný magnetický tok $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$. Magnetický tok Φ indukuje v obou cívkách napětí.

U transformátoru se definuje napěťový převod jako poměr (2.1.1).

$$p = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_{i2}}{U_{i1}} \doteq \frac{U_2}{U_1} [-] \quad (2.1.1)$$

$N_1 [-]$ - počet závitů primárního obvodu, $U_1 [V]$ - vstupní napětí

$N_2 [-]$ - počet závitů sekundárního obvodu, $U_2 [V]$ - výstupní napětí

$U_{i1} [V]$ - indukované vstupní napětí, $U_{i2} [V]$ - indukované výstupní napětí

Důležitým pojmem u transformátorů je také impedanční přizpůsobení (2.1.2). Které nám určuje kdy bude výkon na zatěžovací impedanci maximální.

$$\hat{Z}_{OUT} = \hat{Z}^* [\Omega] \quad (2.1.2)$$

Kde \hat{Z}_{OUT} označuje impedanci výstupu transformátoru a \hat{Z}^* komplexně sdruženou zatěžovací impedanci transformátoru. Mezi hlavní pojmy u transformátoru patří také účinnost η , která je definována jako poměr výstupního a vstupního výkonu (2.1.3).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% [\%] \quad (2.1.3)$$

$P_1 [W]$ - výkon dodávaný na vstup

$P_2 [W]$ - výkon odebíraný z výstupu

Velké transformátory pracují s minimálními ztrátami (účinnost až 99%). U menších transformátorů dochází ke ztrátám znatelnějším (účinnost 70 až 80%), a to vlivem „Jouleova tepla“ na činném odporu obou vinutí, rozptylem magnetického pole mezi cívkami, vlivem hystereze při přemagnetování magnetického obvodu a vlivem vířivých proudů v jádře, které je z tohoto důvodu zhotoveno z elektricky izolovaných plechů.

Transformátory jsou převážně užívány pro převod mezi vysokým a nízkým napětím, k impedančnímu přizpůsobení, galvanickému oddělení, přenosu energie na velké vzdálenosti (zvyšuje napětí při dálkovém přenosu energie, čímž se snižují ohmické ztráty ve vedení v důsledku menšího proudu a snižuje následně napětí pro uživatelský rozvod), atd.

2.2 Piezoelektrický transformátor

Piezoelektrický transformátor, obdobně jako elektromagnetický, slouží k transformaci střídavých elektrických napětí. Jeho primární obvod je buzen napětím o vhodné frekvenci, tzv. rezonanční frekvence, pomocí nepřímého piezoelektrického jevu, na sekundáru je na základě přímého piezoelektrického jevu generováno výstupní napětí. Přenos energie mezi primárním a sekundárním obvodem zprostředkovává společná mechanická deformace obou částí obvodu. Pokud bude koeficient elektromechanické vazby dostatečně velký, můžeme díky piezoelektrickému jevu očekávat velké mechanické kmity prvku. Kmity jsou převedeny vlivem přímého piezoelektrického jevu na sekundár. Mód kmitu závisí na tvaru rezonujícího tělesa a vzorku jeho elektrod.

Piezoelektrické transformátory mohou být vyrobeny z libovolné piezoelektrické látky (monokrystaly nebo keramika), z cenových důvodů se pro běžné aplikace využívá levnější piezokeramika (zejména PZT keramika).

Tyto transformátory mají oproti elektromagnetickým několik výhod [2]:

- malé rozměry a nižší hmotnost
- vyšší účinnost (>90%) při stejném poměru výkonu k objemu
- absence elektromagnetického šumu
- nehořlavost

Pro tyto vlastnosti jsou velice výhodné v souvislosti s vysokým stupněm integrace a miniaturizace moderní elektroniky. Piezoelektrické transformátory se tak vyskytují v AC-AC, AC-DC měničích, řídících jednotkách fluorescenčních lamp se studenou katodou (například podsvícení displejů z tekutých krystalů), často bývají integrovány s piezoelektrickými motory, atd. Aplikace AC-DC (například zdroje stejnosměrného napětí, rychlé regulátory) zeslabujících piezoelektrických transformátorů využívající usměrňovací prvky nebo častěji techniku vysokofrekvenčního spínání za podmínek současné minimalizace rozměrů. Elektromagnetické transformátory ztrácejí účinnost při vysokých frekvencích vlivem magnetických hysterezních ztrát v jádru.

Rozdělení do dvou typů:

- a) homogenní keramická destička
- b) vícevrstvá struktura (multilayer a multistack)

Oba typy mohou mít zesílení elektrického napětí (tj. podíl výstupního a vstupního napětí) větší nebo menší než jedna v závislosti na konstrukci, pracovní frekvenci a impedanční zátěži.

Provozní parametry jsou ovlivněny využitím různých módů mechanických kmitů. Pracovní mód určuje systém elektrod, směr polarizace keramiky a tvar prvku piezoelektrického transformátoru.

Nejvíce omezující faktor použití piezoelektrických transformátorů pro výkonové aplikace patří generování tepla. Nárůst teploty vlivem dielektrických ztrát vede ke změně jeho materiálových vlastností a tím k zhoršování provozních parametrů. Při větším ohřátí může dojít i k mechanickému poškození vlivem teplotního pnutí.

Požadavky na materiál pro piezoelektrické transformátory [2]:

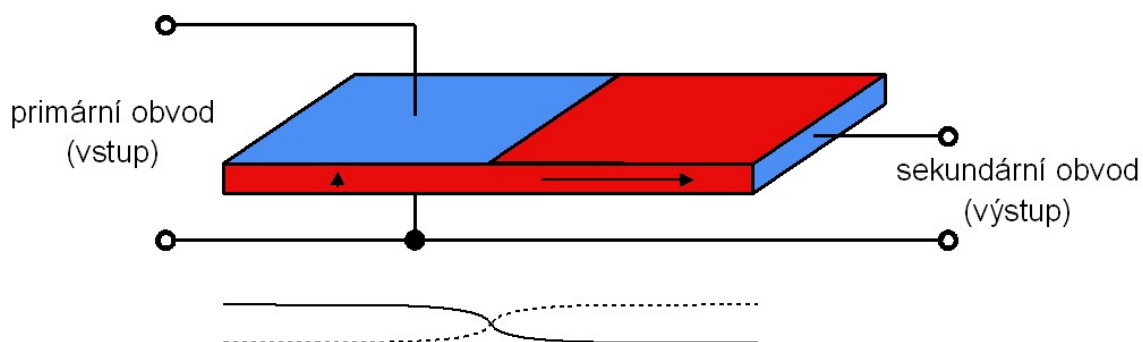
- vysoké koeficienty elektromechanické vazby (zvyšují zesílení)
- vysoká mechanická jakost Q_m (zvyšuje stabilitu frekvence, účinnost a snižuje generování tepla)
- vysoká elektrická jakost Q_e (snižuje množství generování tepla a snižuje závislost impedance transformátoru na frekvenci)
- vysoká Curieova teplota T_C (umožňuje nastavení pracovních podmínek při vyšších teplotách)

Tyto požadavky vedly k návrhům mnoha nových designů piezoelektrických transformátorů. Hlavními parametry transformátoru jsou zesílení vstupního elektrického napětí, výstupní výkon (resp. hustota výstupního výkonu jako podíl výstupního výkonu a objemu transformátoru) a účinnost (podíl výstupního a vstupního výkonu).

2.2.1 Rosenův typ piezoelektrického transformátoru

V roce 1954 skupina C.A. Rosena přišla jako první s technicky použitelným návrhem piezoelektrického transformátoru (Obr 2.2).

Podélné kmity tyčinky, jejichž polovina vlnové délky je rovna celkové délce tyčinky, jsou vybuzeny pomocí nepřímého piezoelektrického jevu působením harmonického elektrického pole ve vstupní části. Vstupní část transformátoru tvoří tloušťkově polarizovaná tyčinka elektrodami situovanými kolmo na směr tloušťky. Díky přímému piezoelektrickému jevu je na výstupní elektrodě generováno napětí. Výstupní část tvoří podélně polarizovaná část piezoelektrického transformátoru. Odvození transformačního poměru pro tento transformátor viz [4]

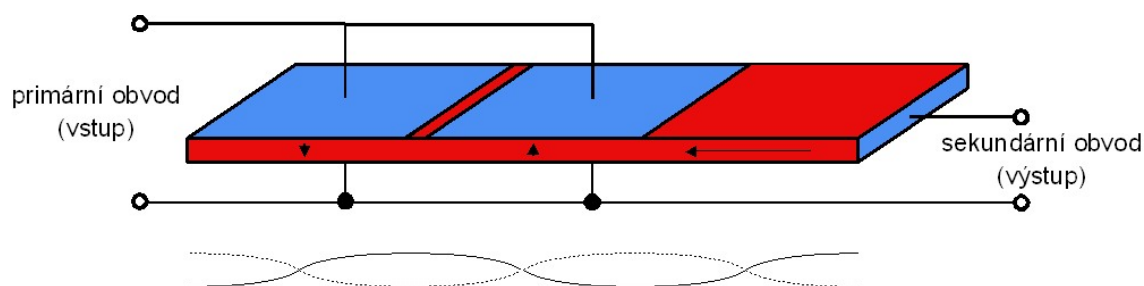


Obr. 2.2 Piezoelektrický transformátor Rosenova typu
(vlnovkou je znázorněna podélná výchylka kmitů a šipkou je vyznačen směr polarizace)

První piezoelektrické transformátory tohoto typu však vykazovaly problémy se spolehlivostí z důvodů velkého elastického napětí, uprostřed transformátorů často docházelo k jejich mechanickému poškození. Na rozhraní oblastí se koncentrují zbytková elastická napětí vzniklá nehomogenní polarizací, ale především maximální elastická napětí indukovaná v uzlu vibrací.

Úpravami transformátoru Rosenova typu je možné odstranit nežádoucí koncentrace mechanických napětí. Jiným uspořádání elektrod, popřípadě polarizací keramiky lze vybudit vyšší řády podélných kmitů. Na Obr. 2.3 je

transformátor, který pracuje na třetím řádu podélných kmitů tyčinky (tj. celková délka transformátoru odpovídá 1,5 násobku vlnové délky λ). Na obou stranách jsou elektrody rozmístěny shodně, vždy ve vzdálenosti $\lambda/2$. Tento typ transformátoru dosahuje typických zesílení 15, účinnosti $>95\%$ a hustoty výstupního výkonu $130\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$.

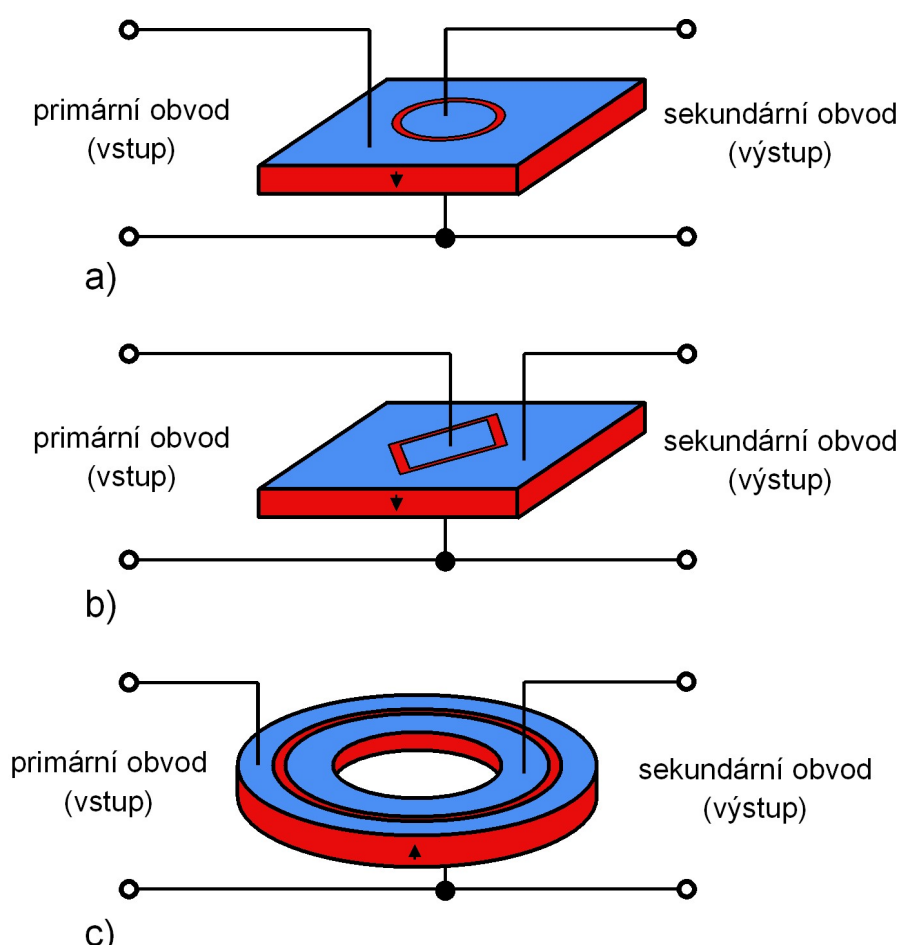


Obr. 2.3 Piezoelektrický transformátor Rosenova typu pracující na třetím řádu podélných kmitů (vlnovkou je znázorněna podélná výchylka kmitů a šipkou je vyznačen směr polarizace)

Další druh piezoelektrického transformátoru [2] je uspořádání do tvaru prstence, který pracuje v módu tečných kmitů a speciálním případem je kruhový transformátor s elektrodami ve tvaru půlměsíce, který využívá plošně rozpínavé kmity ve vstupním obvodu a plošně střížné kmity ve výstupním obvodu. Tento typ transformátoru dosahuje typických zesílení 50, účinnosti $>90\%$ a hustoty výstupního výkonu $14\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$.

2.2.2 Další typy piezoelektrických transformátorů

Piezoelektrické transformátory typu ring-dot využívají planární kmity destičky. Tyto transformátory jsou většinou homogenně polarizovány ve směru tloušťky v celém objemu keramického prvku. Na Obr. 2.4 jsou zobrazeny tři typy těchto transformátorů. Transformátor s pravoúhlou středovou elektrodou (obr. 2.4b) vykazuje oproti transformátoru s kruhovou elektrodou (obr. 2.4a) vyšší účinnost (typické parametry: zesílení 5, účinnost >97%, hustota výstupního výkonu $17 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-3}$).

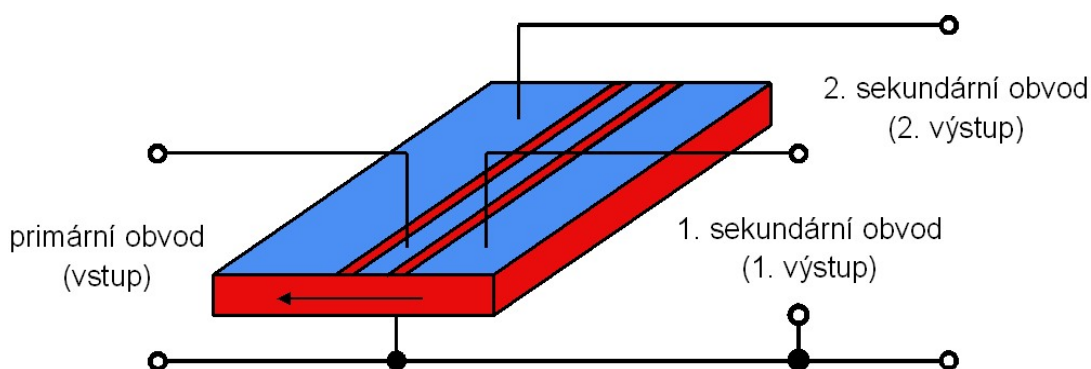


Obr. 2.4 Piezoelektrické transformátory typu ring-dot
(šipkou je vyznačen směr polarizace)

Prstencový transformátor (Obr. 2.4c) pracuje na třetím řádu radiálně rozpínavých kmitů prstence pro lepší rozložení mechanického napětí (typické parametry: zesílení 1,9, účinnost >92%, hustota výstupního výkonu $14 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-3}$).

Spodní elektroda těchto tří transformátorů ring-dot je homogenně nanášena po celé spodní ploše piezokeramického prvku.

Dalším transformátorem s více výstupy je provozován v módu tloušťkové střižných kmitů (Obr. 2.5). Obdélníková destička je homogenně polarizována ve směru šířky v celém svém objemu. Elektrody má nanášeny na horní straně a rozmístěny dle Obr. 2.5, spodní elektroda je společná pro vstupní i výstupní obvod a pokrývá celou spodní stěnu piezokeramického prvku (typické parametry: zesílení <1 , účinnost $>98\%$, hustota výstupního výkonu $10 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-3}$).

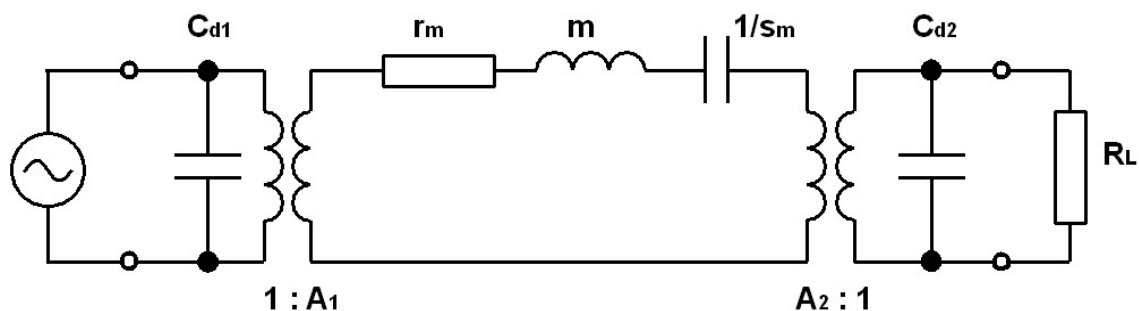


Obr. 2.5 Piezoelektrický transformátor s více výstupy (šipkou je vyznačen směr polarizace)

Nynější výzkum piezoelektrických transformátorů je směřován k nalezení nejvhodnějšího módu a řádu kmitu vzhledem k mechanickému zatěžování použitého rezonančního prvku (např. nežádoucí koncentrace mechanického napětí v uzlech při nehomogenně polarizovaných transformátorech a jejich odstranění). Další výzkum je směřován pro nalezení keramického materiálu s lepšími parametry materiálových vlastností důležitých pro piezotransformátory, než má nyní dostupná keramika PZT, zejména co se týče mechanické jakosti a koeficientů elektromechanické vazby. Je snaha pro piezotransformátory vyvinout keramické materiály, které umožňují větší amplitudy výchylky mechanických kmitů (a tedy i větší zesílení transformátorů). Snaha je také docílit co nejvyšší účinnosti a transformačního poměru vzhledem k ceně transformátoru.

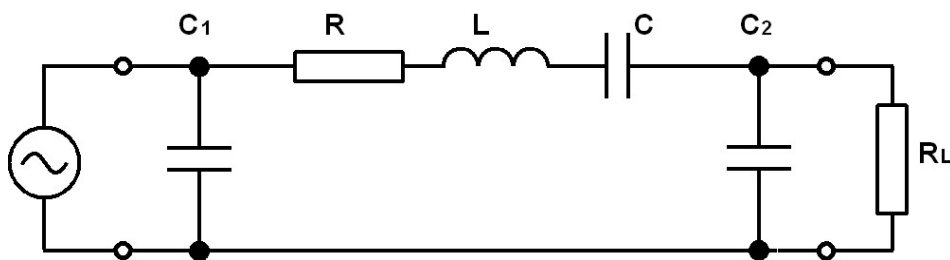
2.3 Náhradní obvod piezoelektrického transformátoru se zátěží

Piezoelektrický transformátor lze nahradit pomocí obvodu uvedeného na Obr. 2.6. Pro mechanickou část se pro názornost elektromechanické přeměny energie využívá analogie s elektrickým obvodem (elektrické napětí nahrazuje sílu, proud rychlost, hmotnost m má význam indukčnosti, mechanický odpor (ztráty) r_m odpovídá elektrickému odporu a poddajnost ($1/s_m$) kapacitě). C_{d1} , C_{d2} , jsou upnuté kapacity vstupu a výstupu piezoelektrického transformátoru a A_1 a A_2 transformační poměry vstupu a výstupu. R_L označuje výstupní zátěž transformátoru. Analogicky elektrické impedanci je mechanická impedance Z_m , která je definovaná jako poměr síly působící na soustavu a rychlosti, kterou soustava vlivem síly kmitá.



Obr. 2.6 Základní elektromechanický náhradní obvod piezoelektrického transformátoru [2]

V elektrické analogii elektromagnetického obvodu soustavy jsou části mechanicky spojené na společnou sílu zapojeny paralelně a části spojené na společnou rychlost zapojeny do série. Zdroj síly je označován jako generátor, páka nebo jiný mechanický převod jako transformátor. Pro účely zapojení piezoelektrického transformátoru do obvodů střídavého proudu lze upravit obvod na Obr. 2.6 elektrickým obvodem na Obr. 2.7.



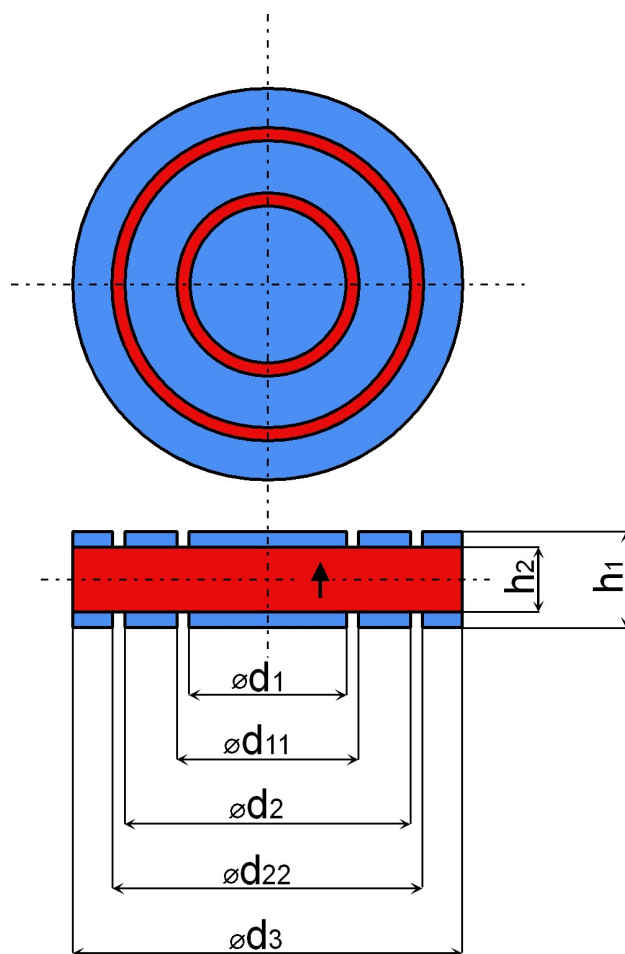
Obr. 2.7 Upravený elektromechanický náhradní obvod piezoelektrického transformátoru [2]

3. Design a příprava vzorků piezoelektrických transformátorů

3.1 Design piezoelektrických transformátorů

Piezoelektrické transformátory typu ring-dot jsou ve tvaru disku s radiálně dělenou elektrodou a využívají radiální kmity [3], které jsou axiálně symetrické podle středové osy prvku. Na transformátoru jsou umístěny z každé strany tři elektrody, které jsou symetrické (viz. Obr. 3.1). Rozměry elektrod u jednotlivých transformátorů jsou uvedeny v Tab. 3 (disky jsou popsány pomocí poměru ploch elektrod primárního a sekundárního obvodu). Pro určení poměru ploch byly použity hodnoty průměrů d_{11} , d_{22} a d_3 . Tloušťka disků je 0,7mm a průměr 30mm.

Všechny transformátory jsou homogenně polarizovány ve směru tloušťky v celém objemu keramického prvku a vyrobeny z tvrdé (hard) piezoelektrické keramiky PZT typu APC 841 (výrobce Piezokeramika, s.r.o., Libřice).



Obr. 3.1 Piezoelektrický transformátor typu ring-dot
(šipkou je vyznačen směr polarizace)

#	1	2	3
poměr ploch elektrod	1,37	2,00	3,69
d_1 [mm]	12	8	6
d_{11} [mm]	14	10	8
d_2 [mm]	22	18	14
d_{22} [mm]	24	20	16
d_3 [mm]	30	30	30
h_1 [mm]	0,77	0,77	0,77
h_2 [mm]	0,7	0,7	0,7

Tab. 3 Rozměry piezoelektrických transformátorů

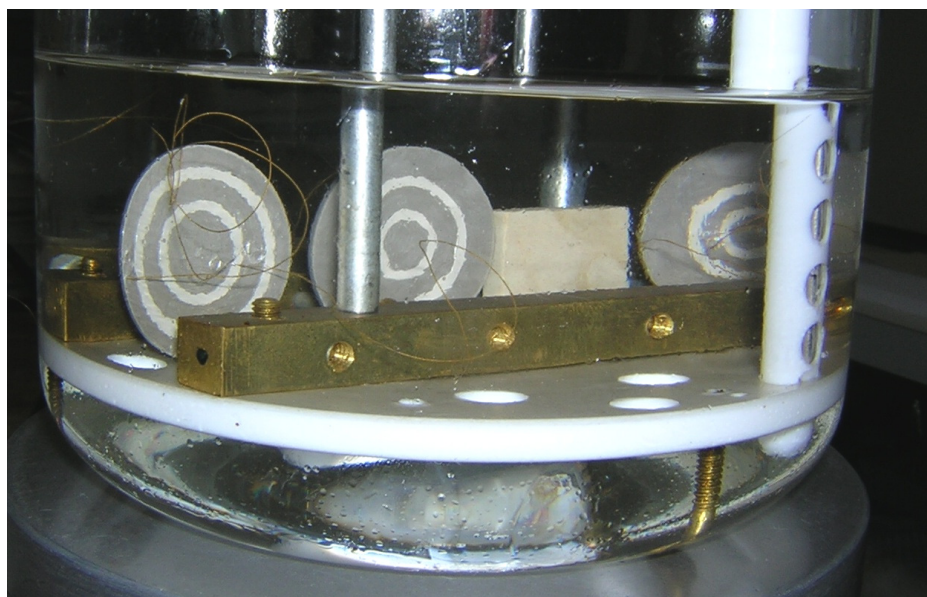
3.2 Postup přípravy vzorků piezoelektrických transformátorů

Vzorky byly vyrobeny z tenkých disků PZT keramiky APC 841. Nanášení elektrod se ve velkovýrobě provádí síťotiskem, což je velice přesné, ale pro naše zkoumání tří typů transformátorů drahé. Rozdělení jednotlivých elektrod bylo provedeno pomocí samolepky, která byla vystřižena ve tvaru prstence o šířce 1mm dle příslušných rozměrů elektrod. Samolepky byly umístěny na jednotlivé keramické disky ve snaze symetrického umístění od středu disku (Obr. 3.2). Dále následovalo nanášení systému elektrod a připojení vodičů pomocí stříbrné pasty. Po odejmutí samolepek bylo zjištěno, že prvky nejsou polarizovány.

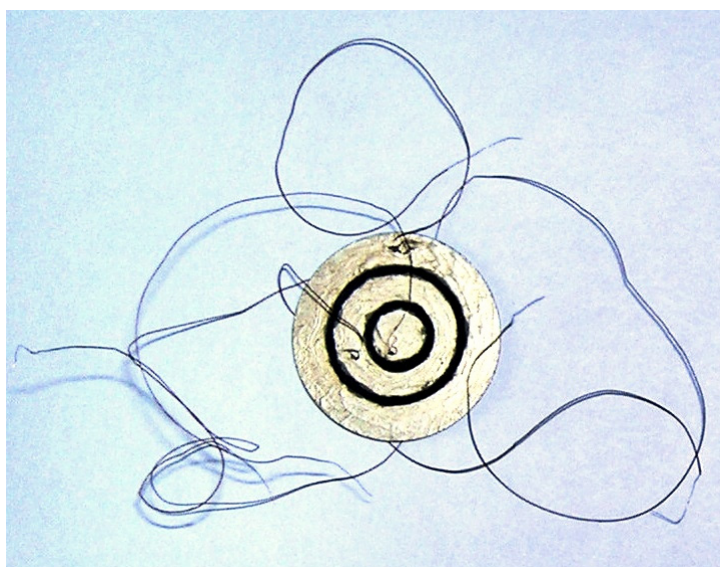


Obr. 3.2 Keramické disky se samolepkami

Na nevodivá místa byla nanесena vodou smyvatelná stříbrná pasta a vzorky byly připraveny k polarizaci. Polarizace byla prováděna v silikonovém oleji, při teplotě 130°C. Po dobu 5 minut elektrickým polem o intenzitě 3kV/mm (Obr. 3.3). Po vyjmutí z oleje a vychladnutí vzorků bylo provedeno odmaštění a odstranění vodou smyvatelné stříbrné pasty. Tím byla příprava vzorků piezoelektrických transformátorů dokončena. Na Obr. 3.4 je ukázka hotového vzorku.



Obr. 3.3 Polarizace keramických disků

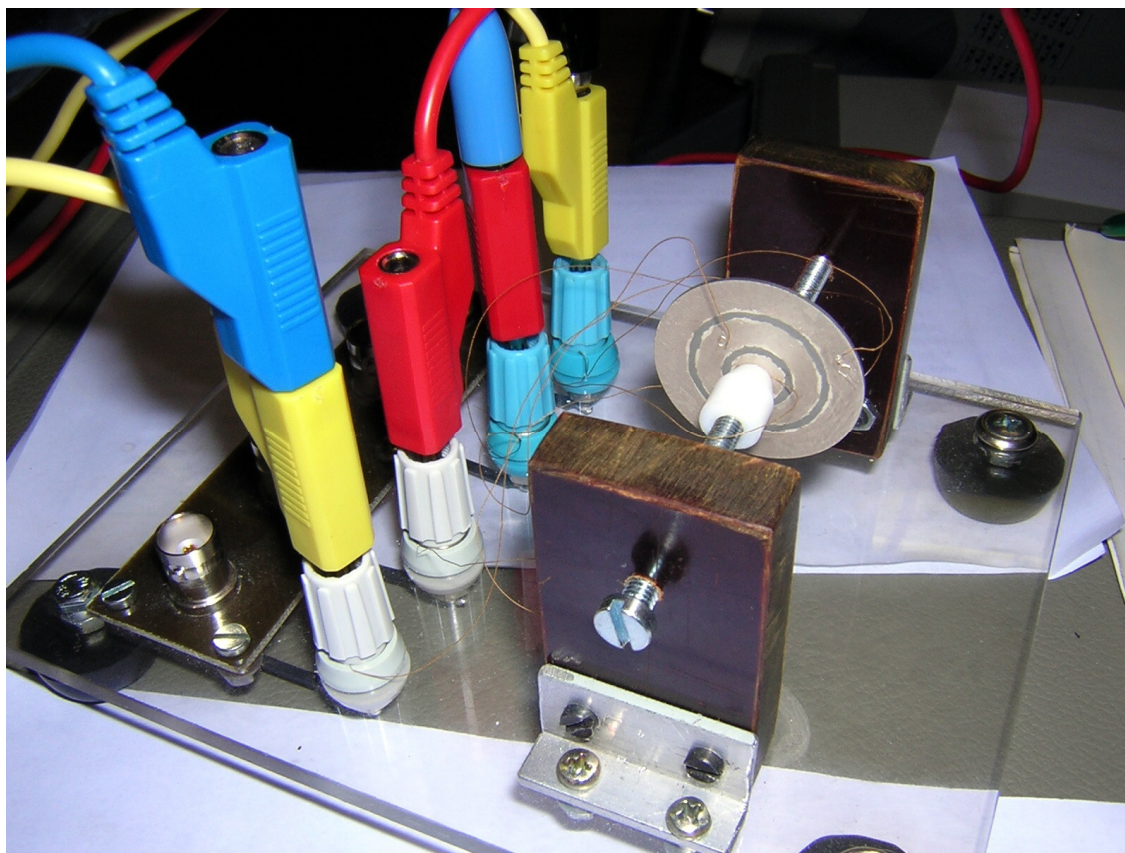


Obr. 3.4 Hotový vzorek piezoelektrického transformátoru s poměrem ploch elektrod 2,00

4. Vlastní měření

4.1 Měření frekvenčních charakteristik piezoelektrických transformátorů

Měřený transformátor je připevněn do měřicího přípravku (Obr. 4.1), kde je uchycen ve svém středu (uzlu kmitů) a je zapojen do elektrického obvodu dle Obr. 4.2. Na vstupu transformátoru je generátor sinusového napětí HP 3325A, které ho budí. Napětí na vstupu (U_{IN}) a výstupu (U_{OUT}) je měřeno pomocí multimetrů Agilent 34401A. Na výstup transformátoru byla zapojena odporová dekáda. Naměřené údaje z multimetrů a generátoru byly posílány po určitých časových intervalech, kdy již bylo dostatečné ustálení měřených hodnot, pomocí sběrnice GPIB do počítače. Zde byly zpracovány a ukládány do textového souboru pomocí připraveného programu v prostředí VEE Pro, který je dodáván pro měřící přístroje firmy Agilent.



Obr. 4.1 Měřicí přípravek s transformátorem

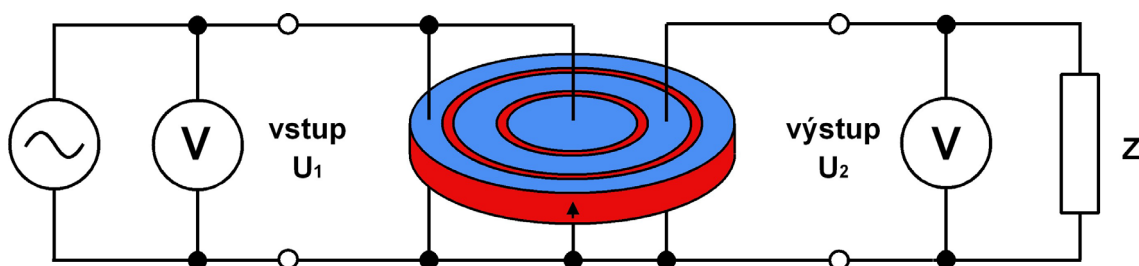
Vlastní měření probíhalo pro čtyři velikosti amplitudy budícího signálu 1V, 2V, 5V a 10V pro jednotlivé zátěže, jejichž hodnoty jsme měnili na odporové dekádě. Nejprve bylo provedeno měření po hrubém kroku 500Hz, kde byly určeny přibližné rezonanční frekvence. Pomocí zjištěných údajů bylo nastaveno jemné proměření po 10Hz v oblasti rezonanční frekvence, aby byla co nejpřesněji určena její hodnota a velikost napěťového zesílení, která se určí dle vztahu 4.1.1.

$$Au = \frac{U_2}{U_1} [-] \quad (4.1.1)$$

U_1 – napětí naměřené na vstupu obvodu

U_2 – napětí naměřené na výstupu obvodu

Nejdříve bylo provedeno měření bez zátěže a následně byla připojena odporová zátěž. Zátěž byla snižována v závislosti na změně zesílení při rezonanci, tak aby bylo spektrum závislosti na zátěži co nejpřesnější. Celé měření bylo provedeno pro všechny tři transformátory.



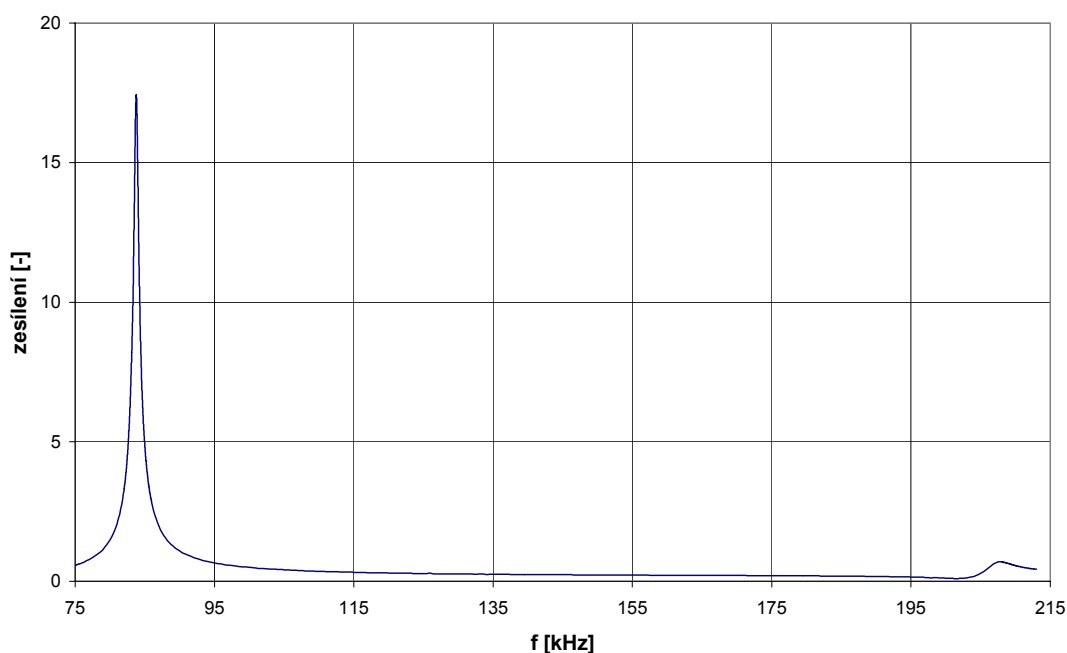
Obr. 4.2 Zapojení piezoelektrického transformátoru

4.2 Výsledky měření

Frekvenční charakteristiky transformátoru s poměrem ploch elektrod 2,00

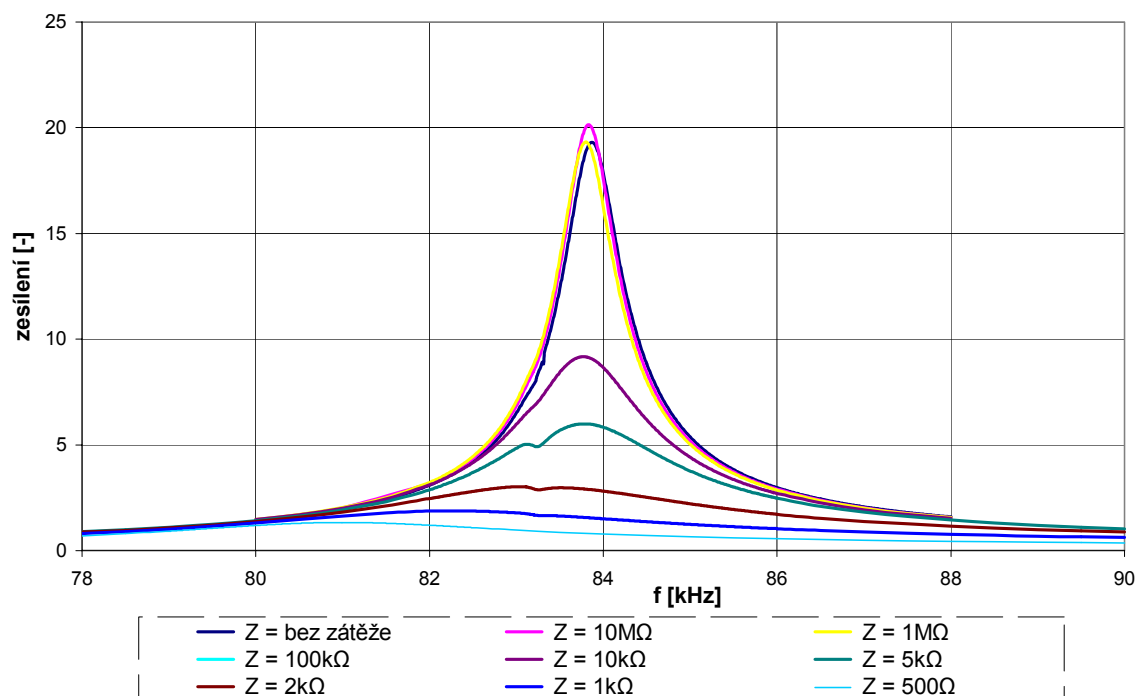
U tohoto transformátoru byla nejvýraznější první rezonanční frekvence na 84kHz, která při zátěži $100\text{k}\Omega$ má napěťové zesílení 17,4. Na spektru (Graf 4.1) je vidět ještě druhá rezonance na frekvenci 208kHz, která má maximální hodnotu napěťového zesílení 0,7. Detailně jsme tedy zkoumali první rezonanci, která je v celém spektru pro své zesílení nejvíce zajímavá.

Graf 4.1 - Spektrum frekvence transformátoru s poměrem ploch 2,00, při amplitudě budícího signálu 1V, $Z = 100\text{k}\Omega$

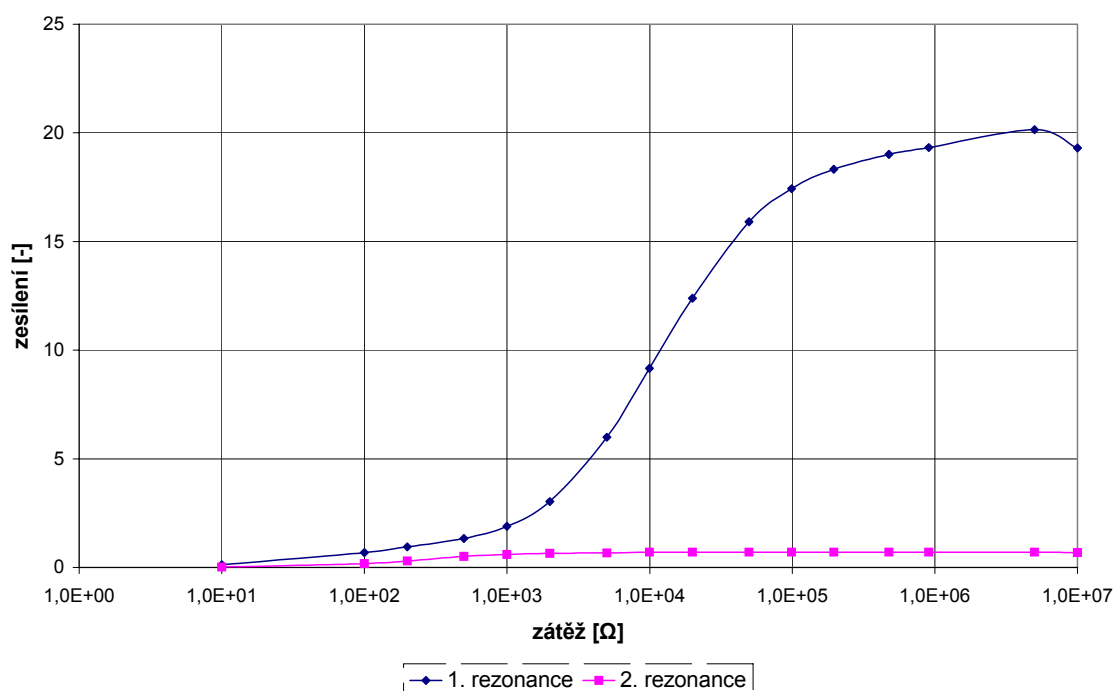


Na Grafu 4.2 je zobrazen posun frekvence a pokles zesílení v závislosti na zatížení. Graf 4.3 ukazuje trend zesílení v závislosti na zatěžování výstupního obvodu transformátoru pro obě rezonance. Průběh relativního posunu frekvence první rezonance v závislosti na zatěžovací impedanci je vidět na Grafu 4.4. Na posledním grafu (Graf 4.5) je zobrazen průběh závislosti zesílení na zatěžovací impedanci výstupního obvodu pro různé amplitudy budícího signálu. Charakteristiky pro zbylé měřené transformátory (1,37 a 3,69) jsou uvedeny v příloze a veškerá naměřená data jsou jako příloha na CD.

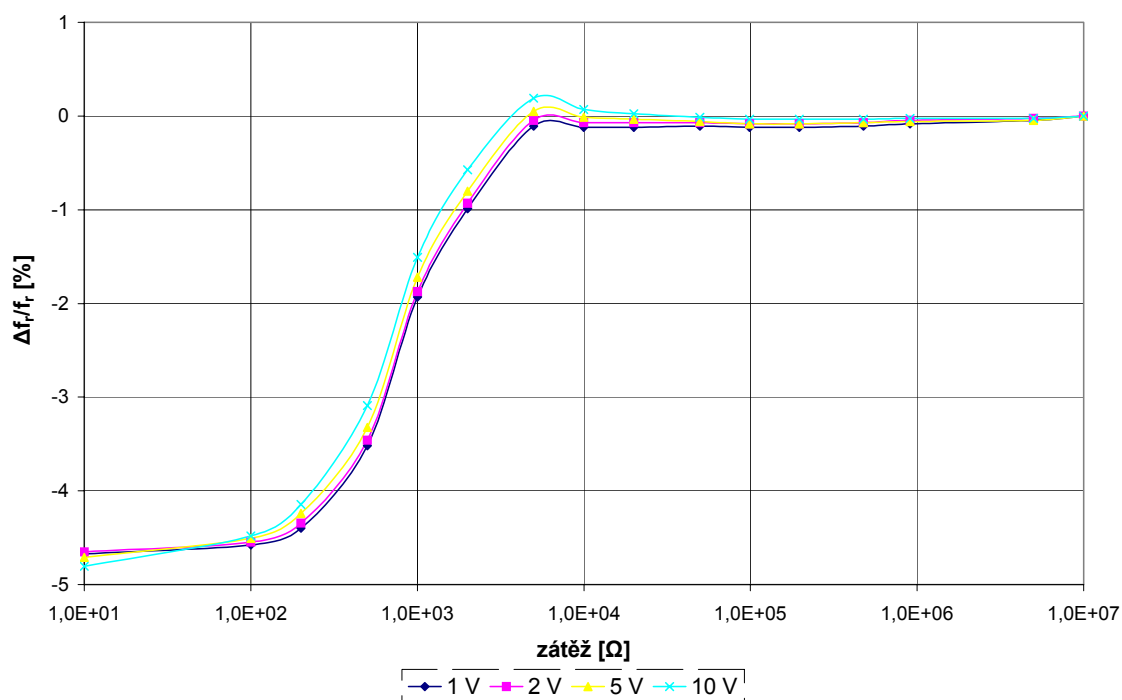
Graf 4.2 - První rezonance pro vybrané výstupní zátěže při amplitudě budícího signálu 1V pro transformátor s poměrem ploch elektrod 2,00



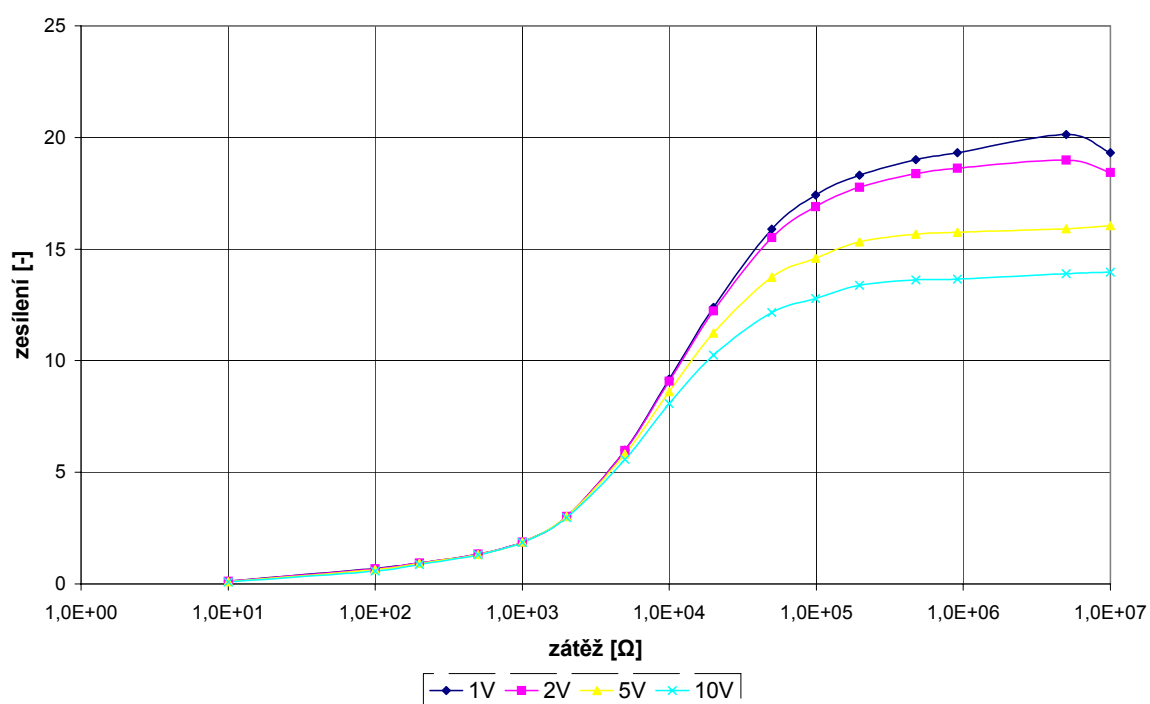
Graf 4.3 - Závislost napěťového zesílení dvou rezonancí v závislosti na zatížení výstupního obvodu při amplitudě budícího signálu 1V



Graf 4.4. - Relativní posun rezonanční frekvence 1.rezonance vůči rezonanční frekvenci při $Z = 10\text{M}\Omega$ v závislosti na zátěži, pro různé amplitudy budícího signálu pro transformátor s poměrem ploch elektrod 2,00



Graf 4.5 - Závislost napěťového zesílení 1. rezonance v závislosti na zatěžování výstupního obvodu pro různé amplitudy budícího signálu



5. Diskuze

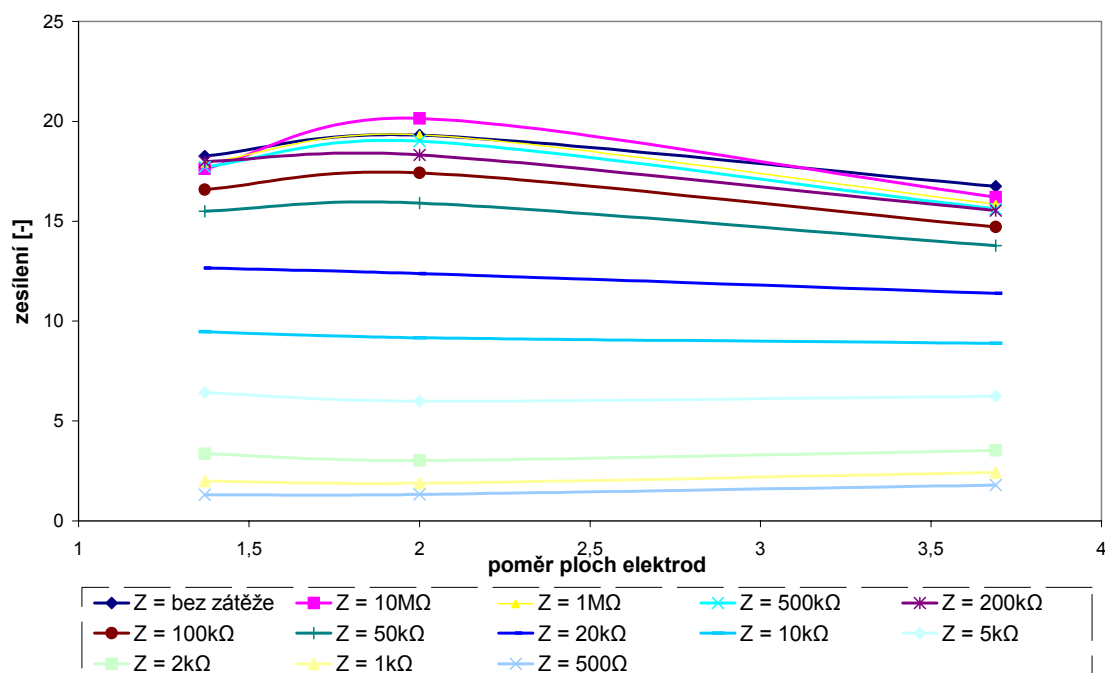
5.1 Hodnocení výsledků

Naměřené frekvenční charakteristiky jednotlivých piezoelektrických transformátorů jsou velice podobné. Všechny mají velice čisté spektrum vykazující pouze dvě rezonance v měřeném rozsahu do 300kHz. První rezonance je poblíž 80kHz, která je dominantní v daném spektru, a druhá rezonance je poblíž 210kHz (Graf 4.1). Napěťové zesílení na první rezonanci se pohybuje v rozmezí od 16 do 21 při zátěži 10M Ω (Graf 5.2). Jak je patrné z charakteristiky závislosti zesílení na zátěži, zesílení začne prudce klesat při hodnotách zátěže nižších jak 100k Ω (Graf 4.3). Při druhé rezonanci je závislost zesílení na zatěžovací impedanci méně závislé, zesílení klesá až při 10k Ω . Zesílení na druhé rezonanci se u transformátoru s poměrem ploch 1,37 a 2,00 pohybuje v rozmezí 0,6 až 0,7 při zátěži 10k Ω a vyšší (Příloha A – Graf A.3 a Graf 4.3). U transformátoru s poměrem ploch elektrod 3,69 se zesílení pohybuje v rozmezí 1,7 až 1,9 při zátěži 10k Ω a vyšší (Příloha B – Graf B.3), což je více než dvojnásobek oproti předchozím. Relativní posun rezonanční frekvence první rezonance je u transformátorů s poměrem ploch elektrod 1,37 a 2,00 v rozmezí -4,2 až -4,7% (Graf 5.3). U transformátoru s poměrem ploch elektrod 3,69 je relativní posun rezonanční frekvence první rezonance menší (-3,3%). Můžeme také pozorovat, že pro vysoké hodnoty zátěže je velikost zesílení závislá i na velikosti amplitudy budícího signálu (Graf 4.5). V oblasti zátěže okolo 1M Ω je rozdíl zesílení mezi amplitudou 1V a 10V až 30%. Se zvyšující se amplitudou klesá zesílení, což je zřejmě projevem nelinearity mechanických kmitů. Pro hodnoty zátěže menší než 10k Ω je rozdíl zesílení již zanedbatelný.

Graf 5.1 ukazuje závislost zesílení první rezonance v závislosti na poměru ploch elektrod pro vybrané zatěžovací impedance. Z průběhů vyplývá, že největšího zesílení je dosaženo pro poměr ploch 2,00, pro vyšší hodnotu poměru ploch již zesílení opět klesá. Tento trend ovšem platí pouze pro zátěže

větší než $20\text{k}\Omega$. Pro zátěž $20\text{k}\Omega$ je trend zesílení s rostoucím poměrem ploch klesající. Pro zátěže nižší než $5\text{k}\Omega$ naopak zesílení s rostoucím poměrem ploch elektrod mírně roste a pro poměr ploch elektrod 3,69 je zesílení nejvyšší.

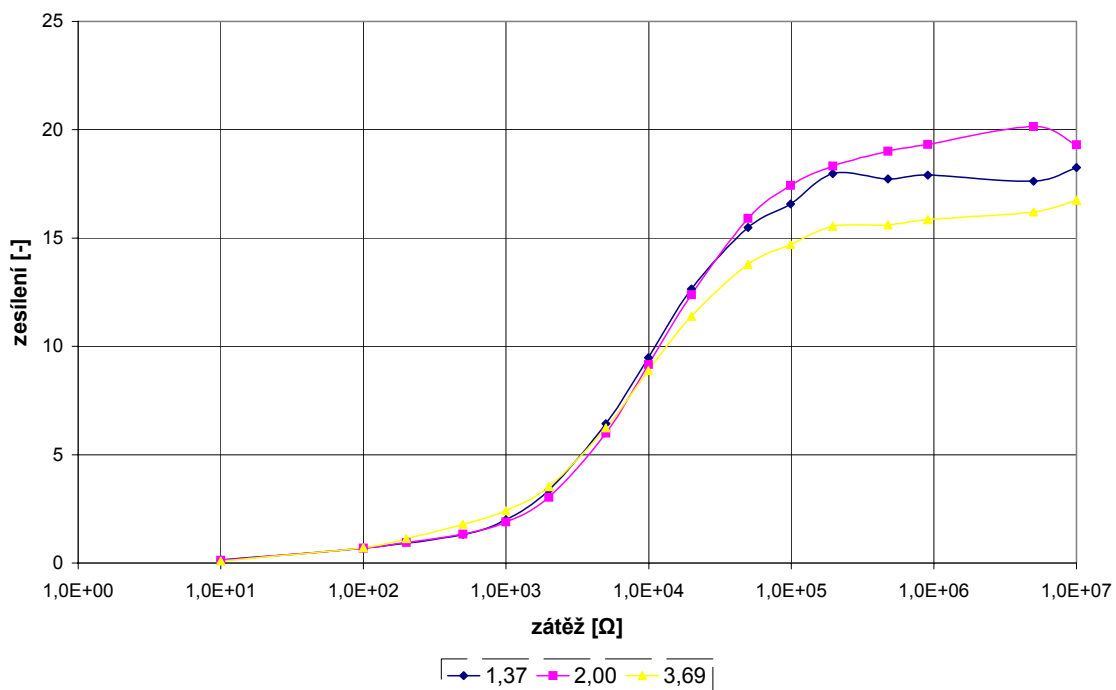
Graf 5.1 - Závislost zesílení 1. rezonance v závislosti na poměru ploch elektrod, pro různé zátěže, při amplitudě budícího signálu 1V.



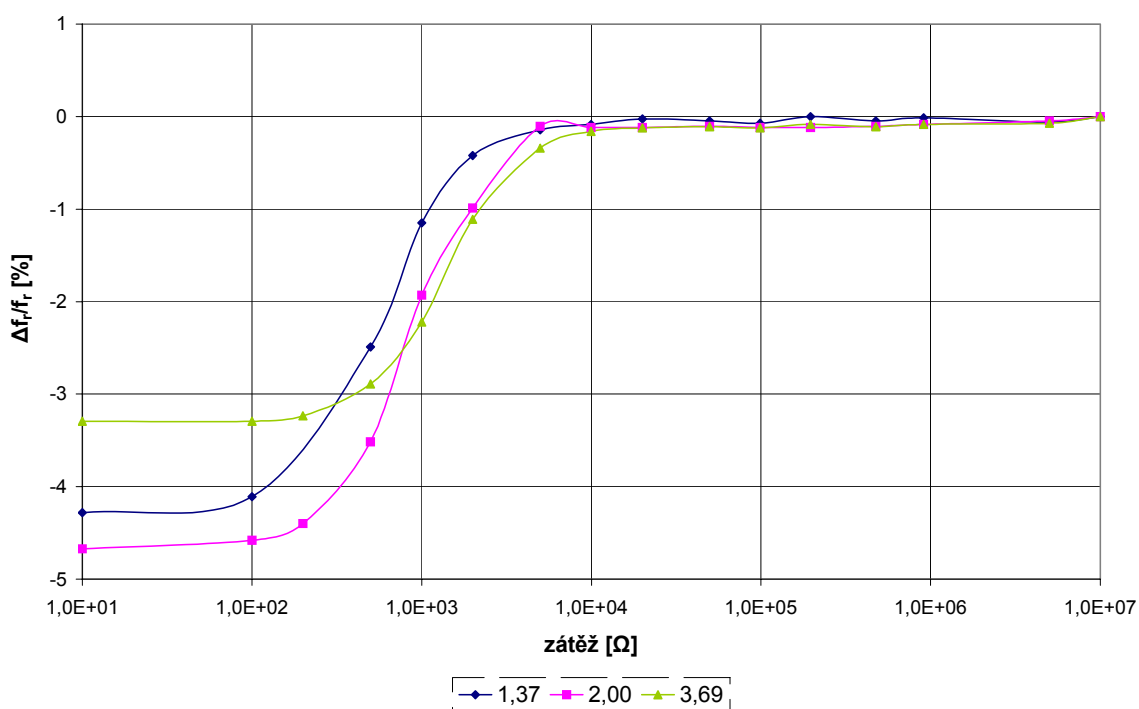
Na grafu 5.2 je zobrazena závislost zesílení první rezonance na zátěži pro jednotlivé transformátory. Transformátor s poměrem ploch elektrod 2,00 dosahuje nejvyšších hodnot napěťového zesílení, pro zátěž $10\text{M}\Omega$ ovšem zesílení klesá. U ostatních transformátorů tento pokles není. Pokles zesílení je zřejmě způsobeno chybou měření, viz. níže.

Graf 5.3 zobrazuje relativní posun frekvence první rezonance v závislosti na zátěži pro jednotlivé transformátory. Transformátory s poměrem ploch elektrod 2,00 a 3,69 mají až do hodnoty zátěže menší než $1\text{k}\Omega$ relativní posun frekvence přibližně shodný. Transformátor s poměrem ploch elektrod 1,37 má nejnižší relativní posun frekvence přibližně až do hodnoty zátěže nižší než 300Ω . Pro nižší hodnoty zátěže má ovšem menší posun frekvence transformátor s poměrem ploch elektrod 3,69.

Graf 5.2 – Závislost zesílení 1. rezonance na zátěži pro jednotlivé transformátory, při amplitudě budícího signálu 1V



Graf 5.3 – Relativní posun rezonanční frekvence 1.rezonance jednotlivých transformátorů v závislosti na zátěži, při amplitudě budícího signálu 1V



Chyba měření při určování rezonanční frekvence by neměla překročit $\pm 5\text{Hz}$, což je polovina kroku s jakou byla měřena při měření frekvence.

Chyba měření při určení napěťového zesílení je nejistota nepřímo měřených veličin. Tato chyba je definována jako totální diferenciál výrazu na výpočet napěťového zesílení (4.1.1).

$$\Delta A_U = \left| \frac{\partial \left(\frac{U_2}{U_1} \right)}{\partial U_1} \Delta U_1 \right| + \left| \frac{\partial \left(\frac{U_2}{U_1} \right)}{\partial U_2} \Delta U_2 \right| = \left| -\frac{U_2}{U_1^2} \Delta U_1 \right| + \left| \frac{1}{U_1} \Delta U_2 \right| \quad (5.1.1)$$

$\Delta A_U [-]$	- absolutní chyba napěťového zesílení
$U_1 [\text{V}]$	- naměřené napětí na vstupu
$U_2 [\text{V}]$	- naměřené napětí na výstupu
$\Delta U_1 [\text{V}]$	- chyba měření napětí na vstupu
$\Delta U_2 [\text{V}]$	- chyba měření napětí na výstupu

Chyba měření střídavého harmonického napětí na multimetru Agilent 34401A pro napěťový rozsah $1 \div 750\text{V}$ a frekvenční rozsah $50 \div 100\text{kHz}$ je $0,60\%$ z naměřené hodnoty a $0,08\%$ z měřicího rozsahu přístroje (5.1.2). Tato chyba vzniká při měření napěťového zesílení na první rezonanci. A pro rozsah $100 \div 300\text{kHz}$ je $4,00\%$ z naměřené hodnoty a $0,5\%$ z měřicího rozsahu přístroje (5.1.3). Tato chyba vzniká při měření napěťového zesílení na druhé rezonanci.

$$\Delta U_{1,2} = 0,012 U_{1,2} + 0,0008 \cdot U_{Ri} \quad (5.1.2)$$

$$\Delta U_{1,2} = 0,04 U_{1,2} + 0,005 \cdot U_{Ri} \quad (5.1.3)$$

U_{Ri} představuje napěťový rozsah měřicího přístroje na vstupu ($i = 1$) a na výstupu ($i = 2$).

Výraz 5.1.1. můžeme zjednodušit dosazením výrazu 5.1.2.

$$\Delta A_U = \left| -\frac{U_2}{U_1^2} \cdot (0,012 \cdot U_1 + 0,0008 U_{R1}) \right| + \left| \frac{1}{U_1} (0,012 \cdot U_2 + 0,0008 U_{R2}) \right| \quad (5.1.4)$$

Matematickými úpravami vztahu 5.1.4 získáme výsledný vztah pro absolutní chybu měření napěťového zesílení při první rezonanci (5.1.5).

$$\Delta A_U = 0,024 \cdot A_U + \frac{0,0008}{U_1} \cdot (A_U \cdot U_{R1} + U_{R2}) \quad (5.1.5)$$

Dosazením výrazu 5.1.3 do výrazu 5.1.1 a následnými matematickými úpravami získáme absolutní chybu měření napěťového zesílení při druhé rezonanci (5.1.6)

$$\Delta A_U = 0,08 \cdot A_U + \frac{0,005}{U_1} \cdot (A_U \cdot U_{R1} + U_{R2}) \quad (5.1.6)$$

Při pohledu na výsledné vztahy je zřejmé, že relativní chyba napěťového zesílení pro první rezonanci dosahuje minimálně 2,4% a pro druhou rezonanci minimálně 8%.

6. Závěr

Měřením bylo získáno mnoho dat o transformátorech s poměrem ploch elektrod 1,37, 2,00 a 3,96. V této práci jsou uvedeny pouze nejdůležitější průběhy a závislosti. Veškerá získaná data jsou umístěna na CD, které je součástí přílohy.

Frekvenční spektrum mají měřené transformátory ve studovaném frekvenčním rozsahu čisté a tak nedochází k úniku energie do jiných módů kmitů. Tento typ transformátoru má díky svému jednoduchému spektru veliké možnosti použití v praxi. Na první rezonanci jsme naměřili napěťové zesílení maximálně 20. Největší zesílení bylo naměřeno u transformátoru s poměrem ploch elektrod 2,00 při zátěži $10\text{M}\Omega$. Toto velké zesílení je dosahováno pouze pro vysoké hodnoty zátěže, pro zátěže nižší než $100\text{k}\Omega$ zesílení značně klesá. První rezonance je tedy vhodná pouze pro realizaci zařízení s malým proudovým odběrem. Druhá rezonance již nevykazovala vysoké zesílení, ale k poklesu zesílení docházelo až pro hodnoty zátěže menší než $10\text{k}\Omega$. To je výhodnější pro zařízení požadující přenos většího výkonu (tj. s vyšším proudovým odběrem). Nejvýhodněji se v tomto ohledu choval transformátor s poměrem ploch elektrod 3,96. Tento transformátor dosahoval při druhé rezonanci největšího zesílení a pro hodnoty zátěže větší než $1\text{k}\Omega$ je přibližně konstantní. Na první rezonanci vykazuje tento transformátor nejnižší zesílení z měřených transformátorů, avšak relativní posun frekvence je nejmenší.

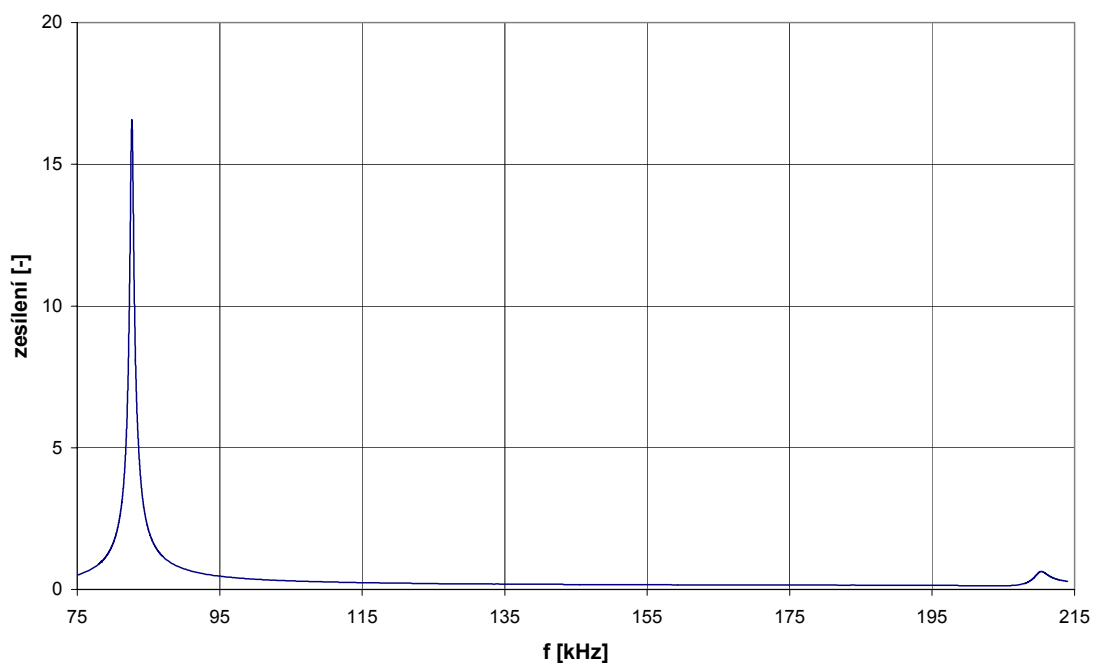
Zesílení studovaných transformátorů na první rezonanci nelze příliš ovlivnit poměrem ploch elektrod.

Použitá literatura:

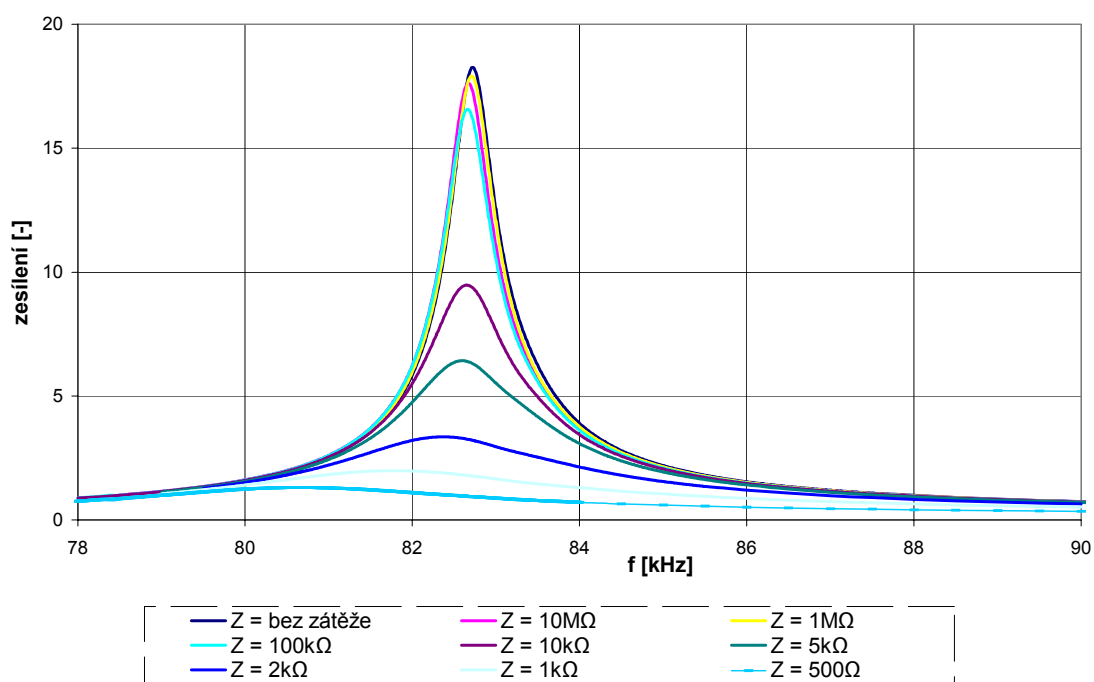
- [1] J.Erhart: Piezoelektrické “chytré” materiály pro elektrotechniku, PZT keramika Elektro 11 (2002) 4-7
- [2] P.Půlpán, J.Erhart: Piezoelektrické transformátory, Elektro 01 (2006) 8-12
- [3] O.Stefan: Obrysové kmity kruhových keramických rezonátorů, Čs.čas.fyz. 20 (1970) 113-122
- [4] J.S. Yang, X. Zhang: Extensional vibration of a nonuniform piezoceramic rod and high voltage generation, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 16 (2002) 29–42
- [5] J. Zelenka: Piezoelektrické rezonátory a jejich použití, Academia Praha, 1983
- [6] APC International, Ltd., <http://www.americanpiezo.com>
- [7] Wikipedie – otevřená encyklopedie, <http://www.wikipedia.org>

Příloha A – Transformátor s poměrem ploch elektrod 1,37

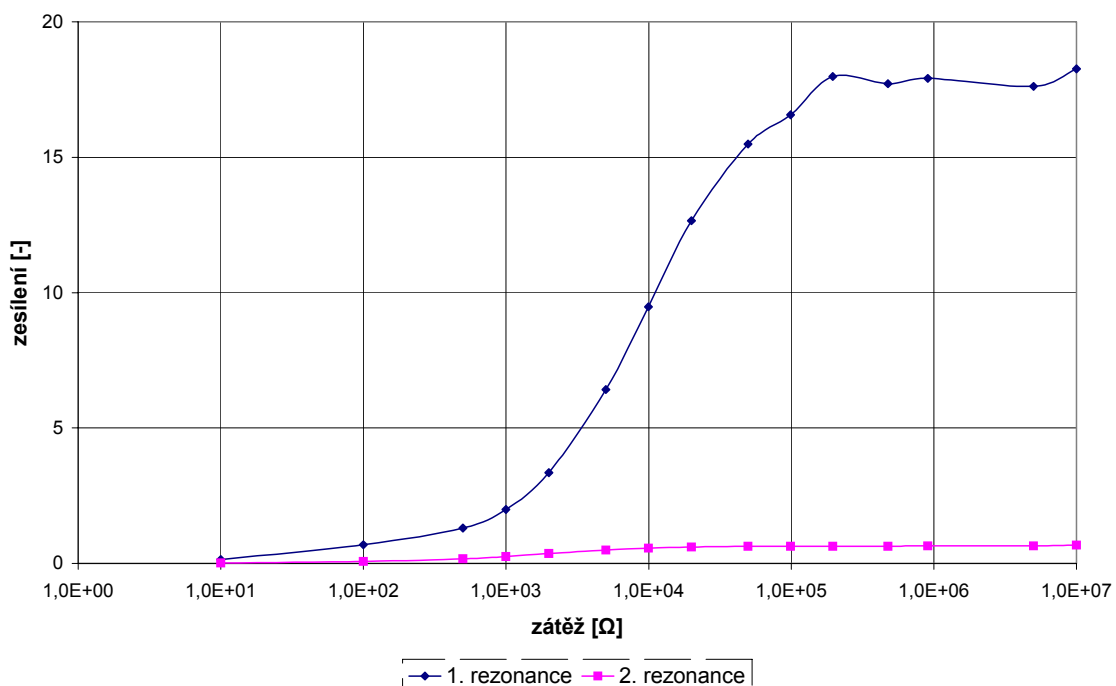
Graf A.1 - Spektrum frekvence transformátoru s poměrem ploch 1,37, při amplitudě budícího signálu 1V, $Z = 100\text{k}\Omega$



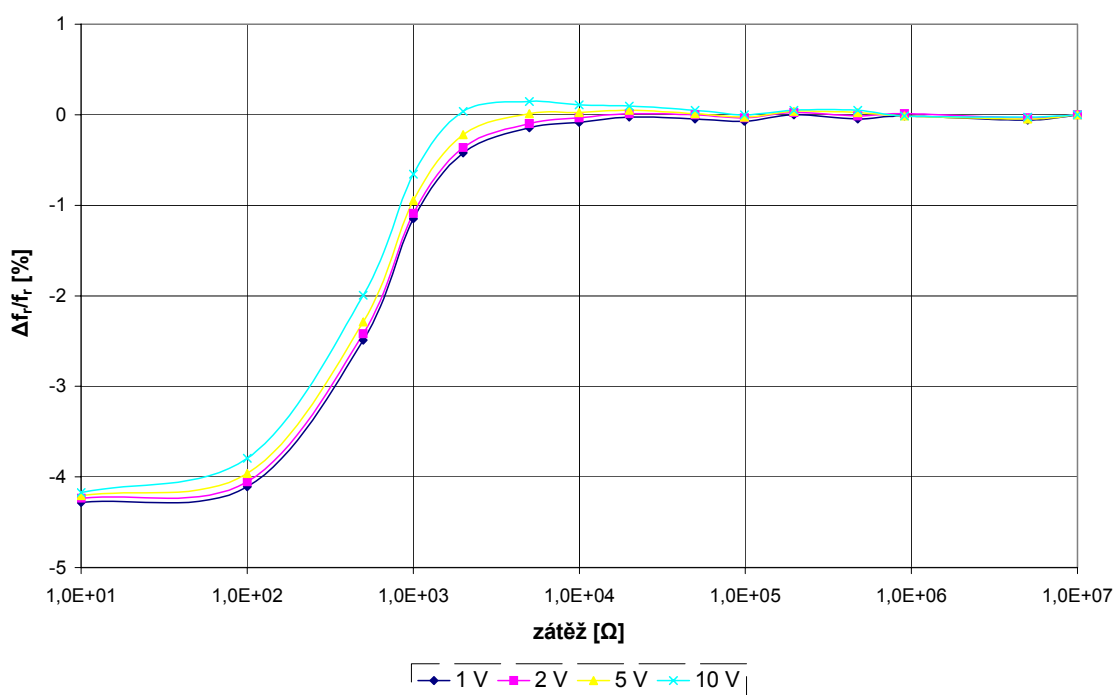
Graf A.2 - První rezonance pro vybrané výstupní zátěže při amplitudě budícího signálu 1V



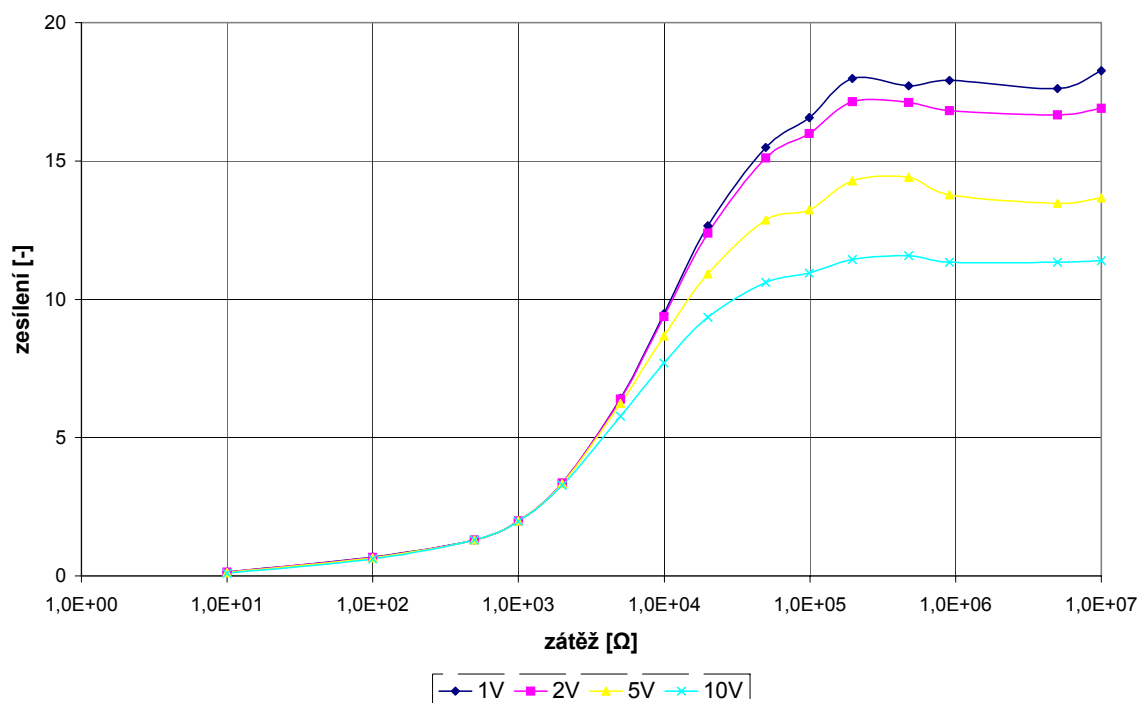
Graf A.3 - Závislost napěťového zesílení dvou rezonancí v závislosti na zatížení výstupního obvodu při amplitudě budícího signálu 1V



Graf A.4 - Relativní posun rezonanční frekvence 1.rezonance vůči rezonanční frekvenci při $Z = 10\text{M}\Omega$ v závislosti na zátěži, pro různé amplitudy budícího signálu

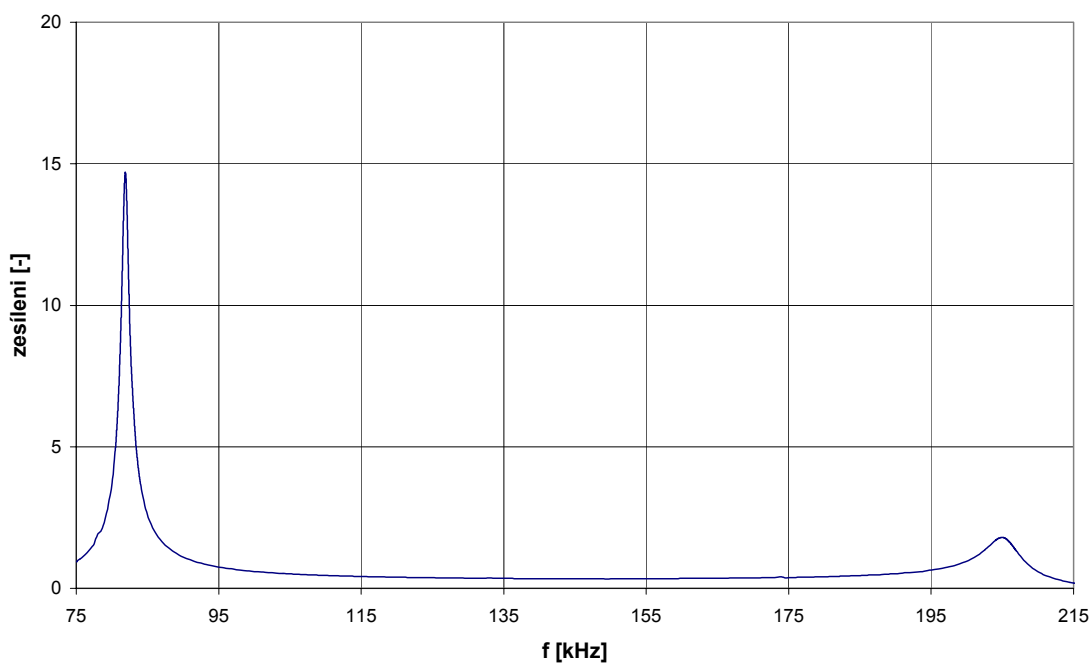


Graf A.5 - Závislost napěťového zesílení 1. rezonance v závislosti na zatěžování výstupního obvodu pro různé amplitudy budícího signálu

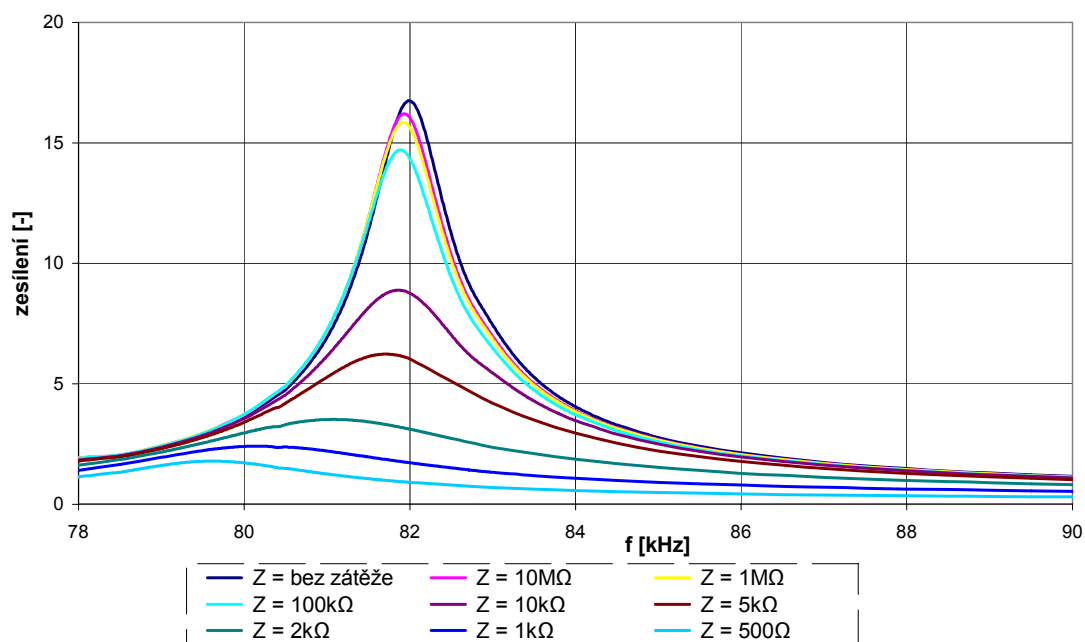


Příloha B – Transformátor s poměrem ploch elektrod 3,69

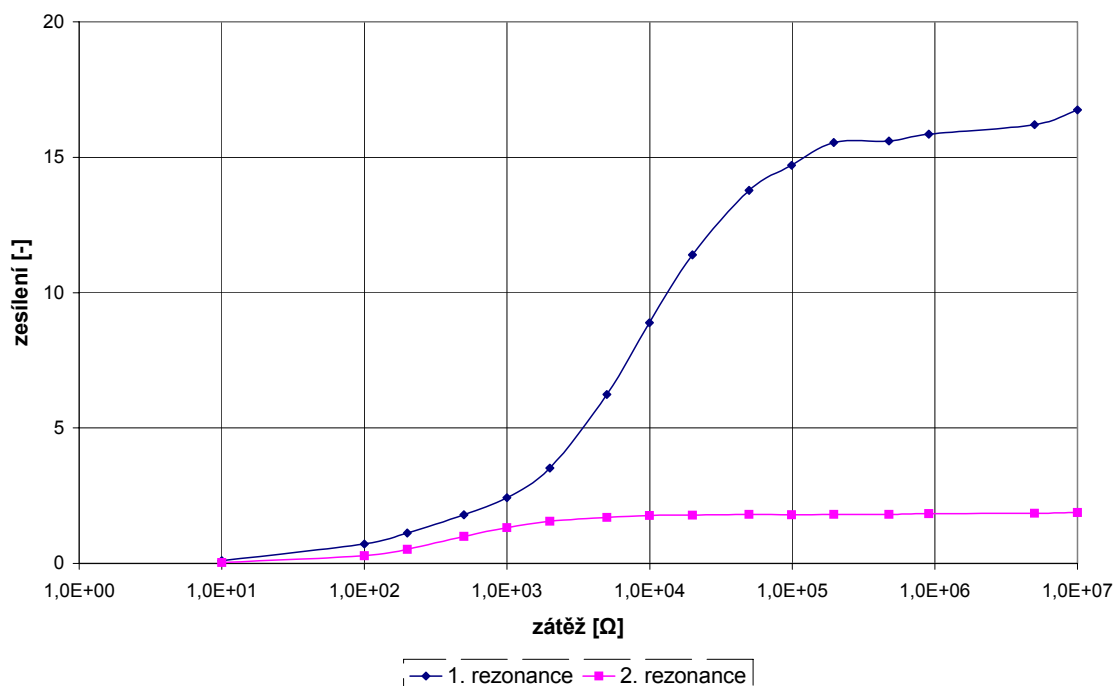
Graf B.1 – Spektrum frekvence transformátoru s poměrem ploch 3,69, při amplitudě budícího signálu 1V, $Z = 100\text{k}\Omega$



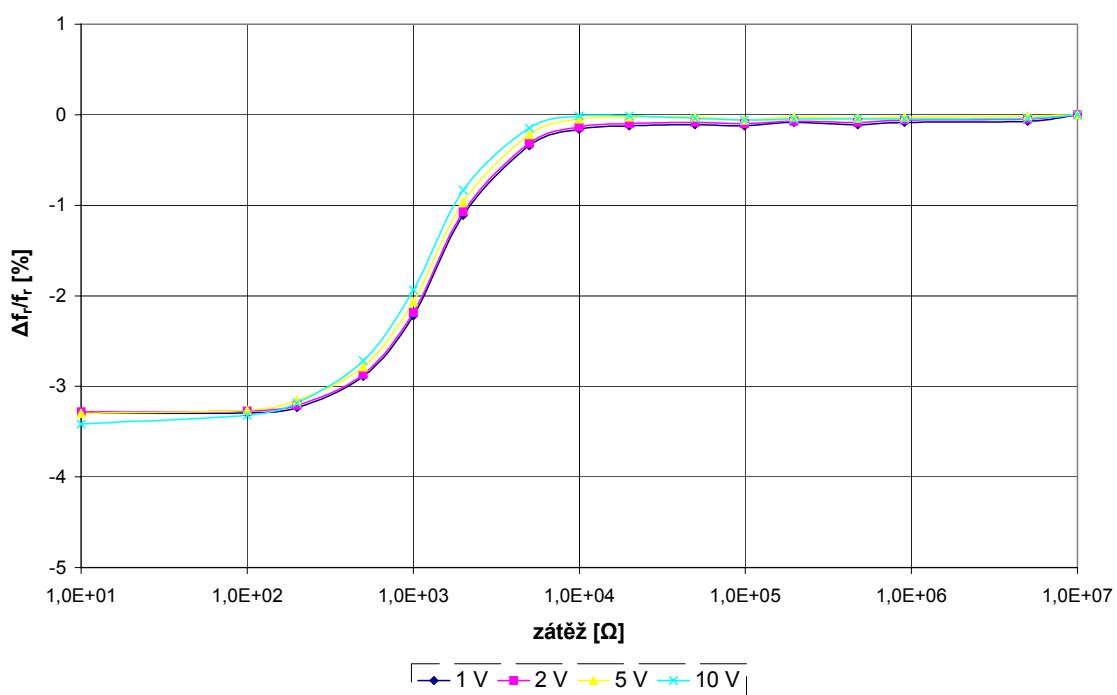
Graf B.2 – První rezonance pro vybrané výstupní zátěže při amplitudě budícího signálu 1V



Graf B.3 – Závislost napěťového zesílení dvou rezonancí v závislosti na zatížení výstupního obvodu při amplitudě budícího signálu 1V



Graf B.4 – Relativní posun rezonanční frekvence 1.rezonance vůči rezonanční frekvenci při $Z = 10\text{M}\Omega$ v závislosti na zátěži, pro různé amplitudy budícího signálu



Graf B.5 – Závislost napětového zesílení 1. rezonance v závislosti na zatěžování výstupního obvodu pro různé amplitudy budícího signálu

